

---

## ANÁLISE DO COEFICIENTE E O DESEMPENHO DO IRRIGÂMETRO E A INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS DO CLIMA NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Ednaldo Miranda de Oliveira<sup>1</sup>, Rubens Alves de Oliveira<sup>2</sup>, Gilberto Chohaku Sedyama<sup>3</sup>, Paulo Roberto Cecon<sup>4</sup>, Luis César Dias Drumond<sup>5</sup>

### RESUMO

Na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, foi desenvolvido um aparelho evapopluiométrico denominado Irrigâmetro, que possibilita medir a lâmina evapotranspirada, fornecendo, diretamente, o momento de irrigar e o tempo de funcionamento ou a velocidade de deslocamento de um sistema de irrigação. Nesta pesquisa, os objetivos foram: (a) determinar o coeficiente do Irrigâmetro ( $K_p$ ), mensalmente, nas alturas 1, 2, 3, 4, 5 e 6 cm do nível de água no evaporatório; (b) avaliar o desempenho do Irrigâmetro para estimar a evapotranspiração nas condições do Alto Paranaíba-MG, nos meses de agosto de 2008 a maio de 2009; e (c) analisar mensalmente os efeitos das interações dos elementos meteorológicos na evapotranspiração de referência, estimada utilizando-se o Irrigâmetro quando operado com diferentes alturas do nível de água no evaporatório. O experimento foi montado em delineamento inteiramente casualizado com seis tratamentos e três repetições. Os níveis de água no evaporatório indicados para estimar a evapotranspiração de referência foram de 4,1; 4,0; 3,6; 3,8; 3,3; 3,0; 2,5; 3,3; 3,0 e 2,9 cm para os meses de agosto, setembro, outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril e maio, respectivamente. Pela análise de trilha, os elementos climatológicos que apresentaram maior correlação com a estimativa da evapotranspiração do Irrigâmetro foram a umidade relativa, para os meses de agosto e janeiro, temperatura mínima e umidade relativa, para o mês de setembro, temperatura máxima e umidade relativa, para o mês de outubro, e temperatura mínima, para o mês de maio.

**Palavras-chave:** Agricultura irrigada, manejo da irrigação, estimativa da evapotranspiração.

### ABSTRACT

#### ANALYSIS OF THE IRRIGAMETER COEFFICIENT AND ITS PERFORMANCE AND INFLUENCE ON THE ELEMENTS OF WEATHER IN ESTIMATIVE EVAPOTRANSPIRATION

At the Federal University of Viçosa, in Viçosa, MG, has developed a device evapopluiometric called Irrigameter, which allows measuring evapotranspiration, providing the right time to irrigate and the time of operation of an irrigation system or the speed of movement. In this research, the objectives were: (a) determine the Irrigameter coefficient ( $K_p$ ), monthly, in the highest 1, 2, 3, 4, 5 and 6 cm of water level in evaporimeter (b) assess the performance of Irrigameter to estimate evapotranspiration under conditions of Alto Paranaíba-MG, in August 2008 to May of 2009, and (c) examine the effects of monthly meteorological variables in the interactions of the reference evapotranspiration estimated by Irrigameter operating with different heights of the level of water in evaporimeter. The experiment was mounted in a completely randomized design with six treatments and three replications. The levels of water in evaporimeter to estimate the evapotranspiration of reference were: 4.1, 4.0, 3.6, 3.8, 3.3, 3.0, 2.5, 3.3, 3, 0 and 2.9 cm for the months of August, September, October, November, December, January, February, March, April and May, respectively. For the path analysis, the climatic factors that had high correlation with the estimate of the evapotranspiration of Irrigameter were the relative humidity for the months of August and January, minimum temperature and relative humidity for the month of September, maximum temperature and relative humidity, for the month of October and minimum temperature for the month of May.

**Keywords:** irrigated agriculture, irrigation management, an estimate of evapotranspiration.

---

**Recebido para publicação em 24/07/2009. Aprovado em 24/02/2011.**

- 1- Engenheiro Agrícola e Ambiental, Doutorando Eng. Agrícola, Depto. de Eng. Agrícola, UFV, Viçosa, MG, ednaldoufv@yahoo.com.br  
2- Engenheiro Agrícola e Agrônomo, Prof. Depto. de Eng. Agrícola, UFV, Viçosa, MG, rubens@ufv.br  
3- Engenheiro Agrônomo, Prof. Depto. de Eng. Agrícola, UFV, Viçosa, MG, g.sedyama@ufv.br  
4- Engenheiro Agrônomo, Prof. Depto. de Estatística, UFV, Viçosa, MG, cecon@ufv.br  
5- Engenheiro Agrônomo, Prof. UFV-Campus Rio Paranaíba, Rio Paranaíba, MG, irriga@ufv.br

## INTRODUÇÃO

No Brasil, a água utilizada na irrigação tem recebido tratamento especial, haja vista que é responsável por uma grande parcela do consumo total, pois cerca de 61% da água captada é usada na agricultura para produção de alimentos (ANA, 2007). Ressalta-se que a área irrigada em 2003/2004, estimada em 3,44 milhões de hectares, equivalia a aproximadamente 6% da área total plantada (CHRISTOFIDIS, 2008). Um desafio essencial na agricultura irrigada é a necessidade de redução das perdas nos sistemas de irrigação: sejam perdas de água nos sistemas de condução e distribuição pelas infraestruturas hídricas, ou perdas devidas à prática de manejo inadequado da irrigação. A escolha dos métodos mais adequados de irrigação é crucial para os irrigantes, pois possibilitará um manejo mais eficiente com práticas voltadas à sustentabilidade das atividades.

Na maioria das áreas irrigadas, é comum observar ausência de manejo racional da água, geralmente resultando em aplicação excessiva, com desperdício de água e energia, além da ocorrência de problemas ambientais, ou em deficiência hídrica para as plantas, com baixa produtividade e prejuízos econômicos ao produtor. Práticas adequadas, como adoção de sistema de manejo e aferição dos sistemas de irrigação, contribuem para aumentar a produtividade e melhorar a qualidade dos produtos agrícolas, otimizando o uso de água e energia e preservando os recursos hídricos e o solo.

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 o manejo da irrigação (SEDIYAMA, 1996). A determinação das necessidades hídricas das culturas é usualmente estimada com base nos valores da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ).

Em razão dos diversos métodos existentes para estimativa da  $ET_0$ , a escolha do mais adequado depende da disponibilidade de dados meteorológicos, do nível de precisão exigido, da finalidade (manejo da irrigação ou pesquisa) e do custo de aquisição dos equipamentos. Esses fatores têm levado pesquisadores a desenvolver métodos alternativos mais simples para determinar

a evapotranspiração para manejo da água de irrigação, com o objetivo de baixar custos, que sejam de fácil manuseio e apresentem precisão e consistência científica.

Neste contexto, uma equipe de pesquisadores da Universidade Federal de Viçosa (UFV) desenvolveu um aparelho denominado Irrigâmetro, para uso no manejo da irrigação. O Irrigâmetro é capaz de estimar a evapotranspiração com confiabilidade, sendo este processo dependente das interações dos diversos elementos meteorológicos e suas interrelações associadas ao correto ajuste do aparelho.

Nesse contexto, o presente trabalho objetivou avaliar o desempenho do Irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência para a região do Alto Paranaíba-MG; determinar o coeficiente do Irrigâmetro ( $K_p$ ) mensalmente para diferentes alturas do nível de água no evaporatório, com base na estimativa de evapotranspiração da cultura obtida no Irrigâmetro e na evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-Monteith - FAO 56; e também analisar os efeitos das interações dos elementos climáticos (temperaturas máxima e mínima do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação) mensalmente, na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, operando com diferentes alturas do nível de água no evaporatório.

## MATERIAIS E MÉTODOS

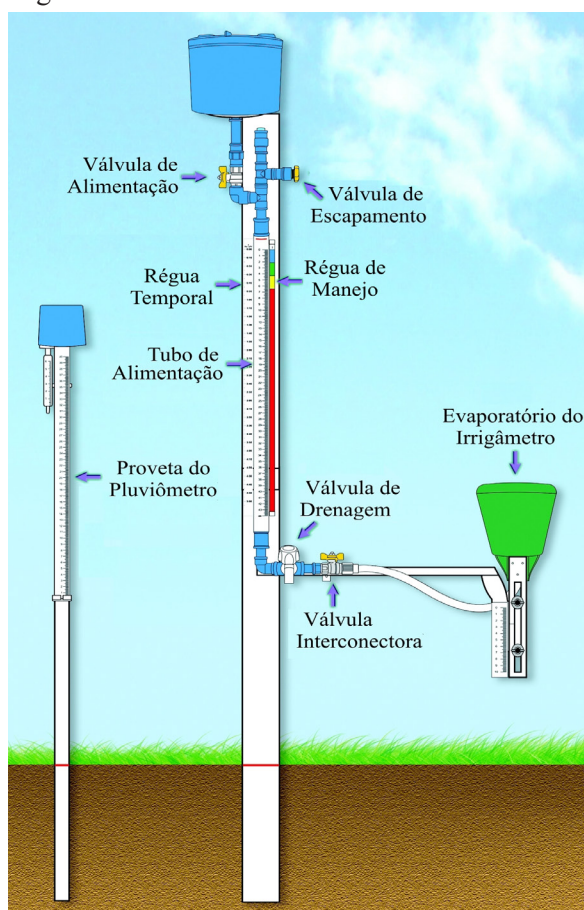
O estudo foi conduzido numa estação experimental da Universidade Federal de Viçosa, localizada no Campus de Rio Paranaíba, no município de Rio Paranaíba, MG, situada a 19° 12' 50" de latitude Sul e 46° 07' 14" de longitude Oeste, numa altitude de 1.090 m.

Na área experimental, foram instalados 18 Irrigâmetros dispostos lado a lado, espaçados de 2,5 m por 1,5 m, com o braço do aparelho voltado para o norte, de maneira que não houvesse sombreamento nos evaporatórios.

Também foi instalada, na mesma área, uma estação meteorológica automática da marca DAVIS, modelo Vantage Pro II, utilizada para coleta dos dados horários de radiação, umidade relativa, velocidade do vento e temperaturas máxima e

mínima do ar, necessários para a estimativa da evapotranspiração.

O tubo de alimentação dispõe de uma escala graduada, em milímetros, que possibilita obter as leituras da lâmina evapotranspirada. Internamente ao tubo de alimentação, há um tubo de diâmetro menor, denominado tubo de borbulhamento, que mantém o nível da água constante no evaporatório. Na extremidade inferior do tubo de alimentação, há uma válvula de drenagem, usada para retirar a água do interior do tubo de borbulhamento e o excesso no tubo de alimentação, a fim de zerar o aparelho e prepará-lo para as próximas leituras. Na parte superior, estão as válvulas de escapamento de ar, de alimentação e o reservatório de água, usados no reabastecimento do tubo de alimentação do Irrigâmetro.



Fonte: Oliveira e Ramos (2008).

**Figura 1.** Representação do Irrigâmetro equipado com evaporatório (direita) e pluviômetro (esquerda).

A estimativa da evapotranspiração da cultura

foi obtida com o uso do irrigâmetro operando com diferentes alturas do nível de água no evaporatório, e a  $ET_0$  foi obtida com a aplicação da Equação 1, na escala horária integrada para valores diários.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + CdU_2)} \quad (1)$$

em que,

$ET_0$  = evapotranspiração de referência,  $\text{mm h}^{-1}$ ;  
 $R_n$  = saldo de radiação na superfície,  $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ;  
 $G$  = densidade do fluxo de calor no solo,  $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ;  
 $T_a$  = temperatura do ar de hora em hora,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $U_2$  = velocidade do vento a 2 m de altura,  $\text{m s}^{-1}$ ;  
 $e_s$  = pressão de saturação de vapor, kPa;  
 $e_a$  = pressão parcial de vapor, kPa;  
 $e_s - e_a$  = déficit de pressão de saturação de vapores, kPa;  
 $\Delta$  = declividade da curva de pressão de saturação de vapor,  $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  
 $\gamma$  = coeficiente psicrométrico,  $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; e  
 $Cd$  = coeficiente de resistência de superfície/aerodinâmica.

Os elementos meteorológicos horários, necessários para obter a evapotranspiração de referência, foram coletados na estação meteorológica automática localizada na área experimental, tendo sido os dados de entrada para o programa computacional REF-ET (ALLEN, 2000).

Para determinar o coeficiente do Irrigâmetro para cada altura de nível de água no evaporatório, bem como a influência dos elementos climáticos associados a essas alturas, o experimento foi montado num delineamento inteiramente casualizado, com seis tratamentos e três repetições. Os tratamentos consistiram de Irrigâmetros equipados individualmente com evaporatórios operando com água nas seguintes alturas (em cm): N1 = 1, N2 = 2, N3 = 3, N4 = 4, N5 = 5 e N6 = 6, tomadas a partir de um nível de referência, numa escala ascendente, próprio do aparelho, totalizando 18 Irrigâmetros na pesquisa.

A altura do nível da água no evaporatório, que corresponde a  $K_f$  igual a 1, ou seja, à altura ajustada para a estimativa direta da evapotranspiração

de referência ( $ET_0$ ), foi determinada com o ajustamento de uma equação que relaciona as alturas dos níveis de água no evaporatório e os respectivos coeficientes do Irrigâmetro obtidos para as diferentes alturas avaliadas.

Para cada tratamento, foi determinado um coeficiente médio mensal para o Irrigâmetro, denominado  $K_I$ , calculado com aplicação da Equação 2, que estabelece a relação entre a evapotranspiração da cultura estimada no Irrigâmetro ( $ETc_I$ ) e a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ).

$$K_I = \frac{ETc_I}{ET_0} \quad (2)$$

O desempenho do Irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência foi analisado comparando os resultados obtidos no aparelho com os obtidos com a equação de Penman-Monteith-FAO 56.

A comparação dos valores foi realizada seguindo metodologia proposta por Allen *et al.* (1989), que se fundamenta no erro padrão da estimativa (EPE), calculado utilizando-se a Equação 3:

$$EPE = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

em que,

EPE = erro padrão da estimativa, mm d<sup>-1</sup>;

$O_i$  = evapotranspiração de referência obtida pelo método padrão, mm d<sup>-1</sup>;

$P_i$  = evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, mm d<sup>-1</sup>; e

n = número de observações.

Esta metodologia se fundamenta na determinação das estimativas da evapotranspiração e foi feita com base nos valores do erro padrão da estimativa (EPE), do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e do coeficiente angular (b) das respectivas regressões lineares simples. A melhor alternativa

foi aquela que apresentou maior  $r^2$ , menor EPE e b próximo da unidade.

O coeficiente de determinação indicou a precisão, sendo o quanto a regressão explica a soma do quadrado total. A comparação entre a evapotranspiração obtida utilizando-se o Irrigâmetro e a evapotranspiração estimada utilizando-se o método de Penman-Monteith foi realizada com uma adaptação da metodologia descrita por Willmott *et al.* (1985). A aproximação dos valores obtidos pelo Irrigâmetro e dos estimados pela equação foi dada por um índice designado de concordância ou ajuste, representado pela letra "d" (WILLMOTT *et al.*, 1985). Seus valores variam de zero, para nenhuma concordância, a 1 para a concordância perfeita.

O índice de concordância é obtido utilizando-se a Equação 4:

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

em que,

d = índice de concordância ou ajuste;

$P_i$  = evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, mm d<sup>-1</sup>;

$O_i$  = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d<sup>-1</sup>;

$\bar{O}$  = média dos valores obtidos pelo método-padrão, mm d<sup>-1</sup>; e

n = número de observações.

A determinação dos efeitos das variáveis meteorológicas na evapotranspiração estimada utilizando-se o Irrigâmetro foi feita com o aparelho operando com diferentes níveis de água no evaporatório.

Uma fonte de geração de modelos adotada neste estudo foi a análise de trilha (*path analysis*). A técnica de estatística multivariada, como a análise de trilha, possibilita realçar os efeitos diretos e indiretos de um conjunto de variáveis climáticas sobre uma variável principal. Assim, pode-se aplicá-la para verificar a importância de um ou mais elementos meteorológicos na evapotranspiração

estimada utilizando-se o Irrigâmetro, operando nos diferentes níveis de água no evaporatório.

As variáveis explicativas foram previamente escolhidas, tendo sido feita, inicialmente, a análise de correlação linear simples (correlação de Pearson), utilizando o programa estatístico GENES 2007.0.0 (Análise de Métodos Biométricos Aplicados à Genética Quantitativa Estatística Experimental), para obter as matrizes de correlação e suas significâncias pelo teste “t”, em níveis de 1 e 5% de probabilidades. Posteriormente, foi feita a análise de trilha, com o objetivo de estimar as correlações e analisar a relação entre as variáveis explicativas temperaturas máxima e mínima do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação pelos seus desdobramentos em efeitos diretos e indiretos sobre a variável principal, no caso a evapotranspiração estimada utilizando-se os Irrigômetros equipados com evaporatórios, operando níveis de água N1, N2, N3, N4, N5 e N6, correspondentes aos níveis 1, 2, 3, 4, 5 e 6 cm, respectivamente.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período experimental, observou-se grande amplitude dos valores de umidade relativa do ar. A umidade relativa média diária foi, em grande parte do período experimental, superior a 70%, classificada como alta, com a ocorrência de valores extremos, sendo 29,7% e 100% os valores mínimo e máximo, respectivamente. Valores próximos de 100% foram observados nos últimos meses do experimento, ocorrendo uma maior incidência de condensação e escoamento de orvalho nas paredes internas do evaporatório, sendo necessário então fazer a retirada do excesso de água do seu interior.

A temperatura média do ar ficou em torno de

21 °C, tendo sido observados valores máximo e mínimo de 27,4 °C e 14,8 °C, respectivamente. A velocidade média do vento foi inferior a 2 m s<sup>-1</sup>, considerada leve, de acordo com Doorenbos & Pruitt (1977). A radiação média diária do período em estudo foi de 223,6 W m<sup>-2</sup>, equivalente a 19,32 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

No Quadro 1 encontra-se apresentado o resumo da análise de variância dos dados de evapotranspiração estimada utilizando-se o Irrigâmetro para os diferentes níveis de água dentro do evaporatório.

Observa-se que o quadrado médio dos níveis da água no evaporatório é muito superior ao quadrado médio do resíduo. Logo, a evapotranspiração estimada utilizando-se o Irrigâmetro foi significativamente afetada pelo aumento do nível de água dentro do evaporatório.

No Quadro 2, encontram-se os coeficientes do Irrigâmetro (K<sub>p</sub>), erro padrão da estimativa (EPE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação (r<sup>2</sup>) e coeficiente angular (b), obtidos dos valores de evapotranspiração estimados utilizando-se o Irrigâmetro, em cada nível de água no evaporatório.

No Quadro 2 observa-se que a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro aumentou com a elevação do nível de água dentro do evaporatório. À medida que aumentou o nível de água dentro do evaporatório, houve ampliação da área exposta à atmosfera e, conseqüentemente, maior interceptação da radiação solar, variável que exerce grande influência no processo da evaporação (CHANG, 1971). Ao mesmo tempo, favorece a ação do vento, atuando na remoção do ar saturado sobre a superfície evaporante, acarretando maiores valores de evaporação. No entanto, quando o nível da água permaneceu mais distante da borda do evaporatório, ocorreram diminuição da área

**Quadro 1.** Resumo da análise de variância para os níveis de água dentro do evaporatório

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Quadrados médioS
Níveis da água	5	2,0114**
Resíduo	12	0,0751
Coeficiente de variação (%)		4,89

\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

exposta à atmosfera e maior sombreamento da água no seu interior, provavelmente diminuindo o efeito da radiação e da velocidade do vento. Resultados como esses foram encontrados por Tagliaferre (2006) em estudos envolvendo os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 operando com Irrigâmetro modificado.

No período avaliado, o menor erro padrão da estimativa e o maior índice de concordância foram obtidos com o Irrigâmetro operando com água no evaporatório no nível 4 cm, indicando melhor desempenho para a estimativa da  $ET_0$ , diante dos demais níveis estudados. Assim, operando-se o Irrigâmetro com o evaporatório no nível N4 foi o que apresentou resultados mais confiáveis para a estimativa da  $ET_0$  em intervalos diários.

Observa-se, na Figura 2, a comparação entre a evapotranspiração de referência e a evapotranspiração estimada utilizando-se o

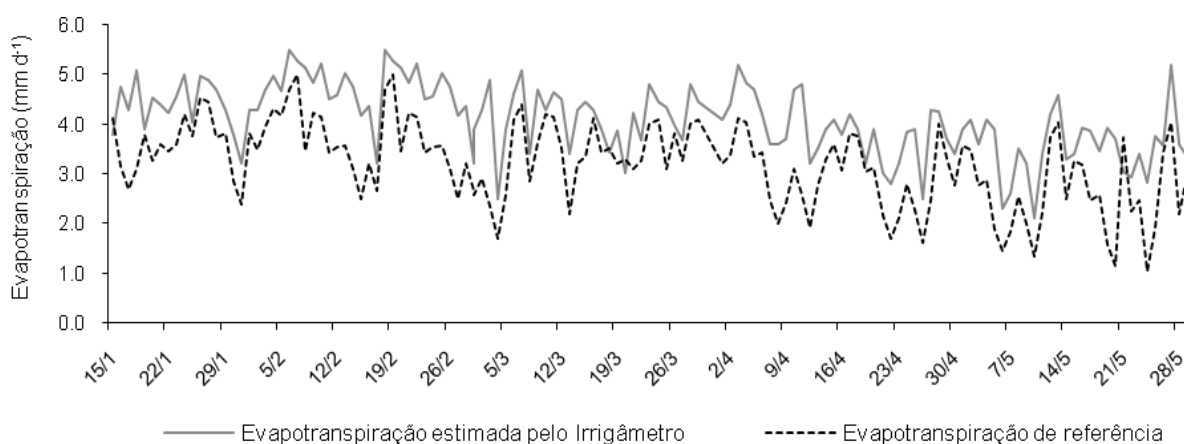
Irrigâmetro operando com o nível de água no evaporatório em 4 cm. Percebe-se comportamento semelhante entre os dois métodos, sendo que com o Irrigâmetro houve superestimativa do valor médio da evapotranspiração de referência em 3,2%.

Para níveis menores que 4 cm, os valores de evapotranspiração encontrados geraram linhas que ficaram abaixo da evapotranspiração de referência. Já para os níveis maiores que 4 cm, as linhas geradas passaram acima das curvas mostradas na Figura anteriormente. Isso se deve ao fato de níveis de água menores que 4 cm proporcionarem subestimativa e níveis maiores superestimativa da evapotranspiração de referência.

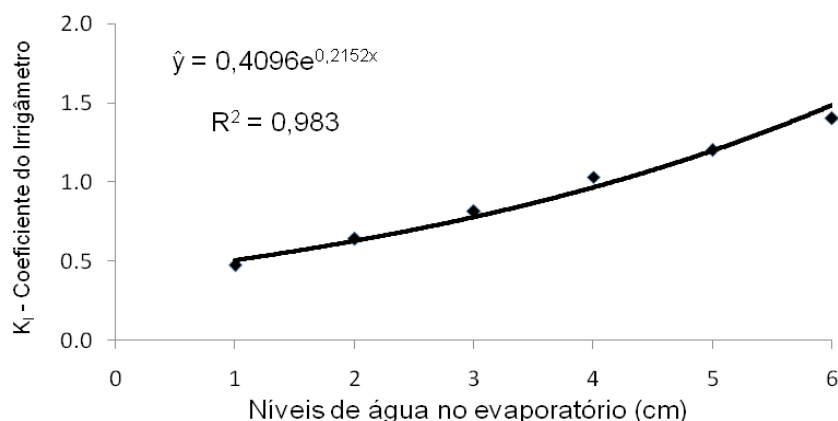
Na Figura 3 estão apresentados os valores do coeficiente do Irrigâmetro em função dos diferentes níveis de água no interior do evaporatório para todo o período experimental.

**Quadro 2.** Valores médios do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_f$ ), erro padrão da estimativa (EPE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente angular (b) e valores de  $ET_{c_f}$ , em intervalos diários

Nível (cm)	$K_f$	EPE	d	$r^2$	b	$ET_{c_f}$ (mm d <sup>-1</sup> )
1	0,52	2,35	0,47	0,29	0,39	2,29
2	0,62	1,98	0,52	0,25	0,43	2,74
3	0,77	1,24	0,74	0,64	0,75	3,41
4	0,87	0,79	0,87	0,75	0,80	3,86
5	1,24	1,37	0,72	0,53	0,83	5,48
6	1,39	2,01	0,61	0,53	1,01	6,14



**Figura 2.** Comparação entre a evapotranspiração de referência e a evapotranspiração estimada utilizando-se o Irrigâmetro, em mm d<sup>-1</sup>, operando com o nível de água no evaporatório em 4 cm.



**Figura 3.** Relação entre o coeficiente do Irrigâmetro e os níveis de água dentro do evaporatório, para todo o período experimental.

**Quadro 3.** Valores mensais dos níveis de água no evaporatório do Irrigâmetro utilizados para determinação da evapotranspiração de referência correspondentes ao K<sub>1</sub> igual a 1

Meses	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai
Nível (cm)	4,1	4,0	3,6	3,8	3,3	3,0	2,5	3,3	3,0	2,9

De acordo com a equação de regressão ajustada, a análise dos dados para todo o período experimental indicaram que, para estimar a evapotranspiração de referência com o uso do Irrigâmetro na região do Alto Paranaíba-MG, deve-se operar o aparelho com o nível de água no evaporatório igual a 4,1 cm. Em estudo realizado na região de Viçosa-MG, Caixeta (2009) obteve uma equação de regressão semelhante, em que para estimar evapotranspiração de referência com o uso do Irrigâmetro, deve-se operar o aparelho com o nível de água no evaporatório igual a 2,4 cm. Paula (2009), em trabalho semelhante na região do Jaíba-MG, concluiu que para estimar a evapotranspiração de referência com o uso do Irrigâmetro, deve-se operar o aparelho com o nível de água no evaporatório igual a 3,9 cm.

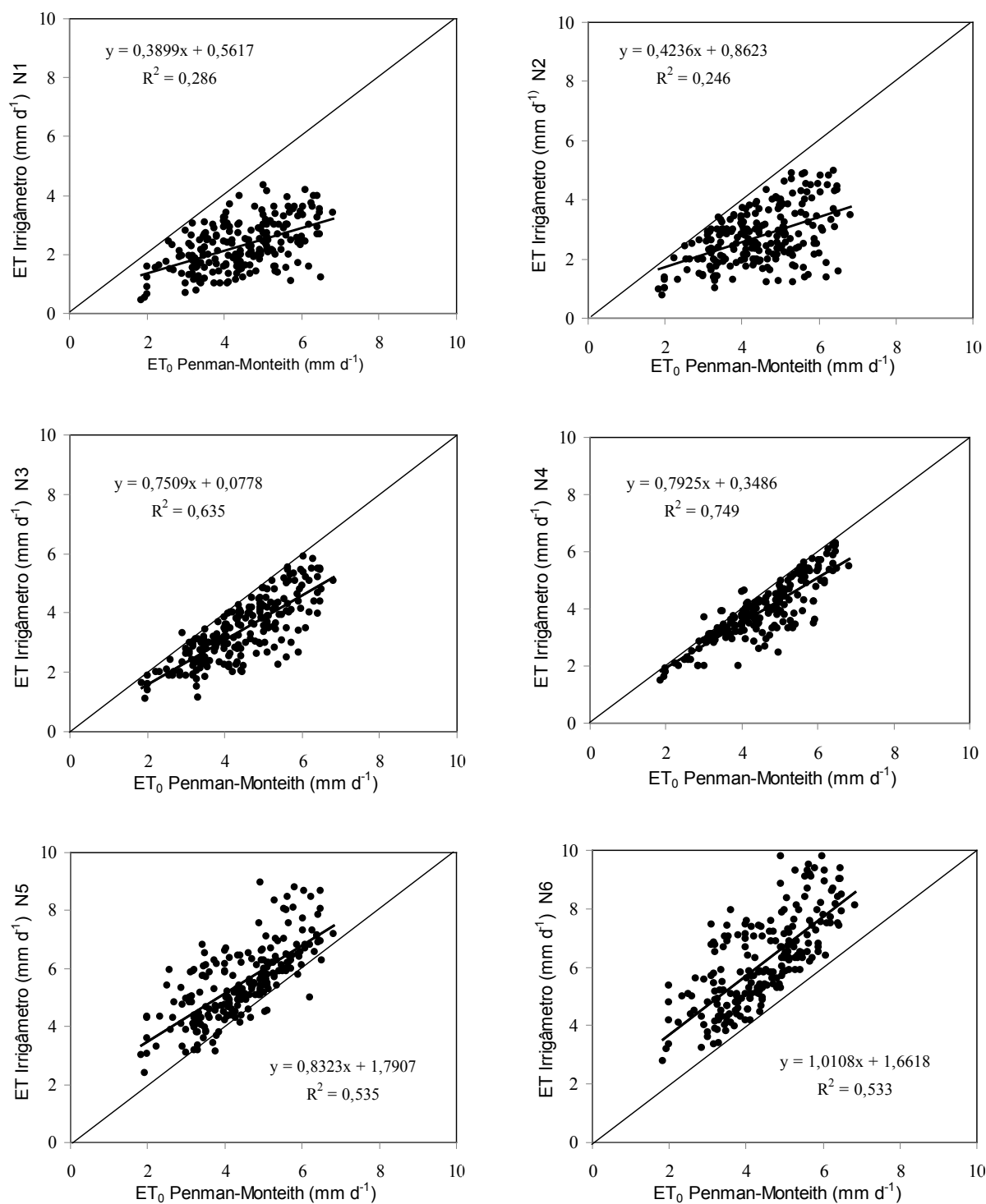
O bom ajuste desse modelo aos dados obtidos indica que a equação de regressão pode ser utilizada para determinar os níveis de água no evaporatório do Irrigâmetro para obter diretamente a evapotranspiração de referência ou da cultura para qualquer estágio de desenvolvimento, na região do Alto Paranaíba-MG. Nota-se, então, como desvantagem, a necessidade de ajustes regionais para o uso do aparelho adequadamente.

Para estimar a evapotranspiração de referência

com o uso do Irrigâmetro na região do Alto Paranaíba-MG para os meses de agosto a maio, deve-se operar o aparelho com o nível de água no evaporatório correspondente ao K<sub>1</sub> igual a 1 nas alturas apresentadas no Quadro 3.

Percebe-se um decréscimo nos níveis de água no evaporatório nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Uma explicação para isso pode ser o início do período de chuvas e o consequente aumento da nebulosidade e da umidade relativa do ar na região, contribuindo para a diminuição da evaporação. Os valores menores para os meses de abril e maio ocorreram em decorrência do decréscimo na temperatura média que ocorreu nesse período. Em estudo realizado na região de Viçosa-MG, Oliveira *et al.* (2007) descreveram a tendência de diminuir o nível de água no evaporatório para estimar a evapotranspiração de referência, com o decréscimo da temperatura média.

Na Figura 4 encontram-se apresentados os valores diários de evapotranspiração estimados utilizando-se o Irrigâmetro operando em diferentes níveis de água no evaporatório, comparativamente ao método de Penman-Monteith FAO 56, além das equações de regressão ajustadas e os respectivos valores do coeficiente de determinação.



**Figura 4.** Comparação entre a evapotranspiração estimada com o uso do Irrigâmetro para diversos níveis de água no evaporatório e os valores de ET<sub>0</sub> obtidos utilizando-se o método de Penman-Monteith FAO 56, em intervalos diários.



Na Figura 4 observa-se que o Irrigâmetro proporcionou subestimativa na evapotranspiração de referência, operando com níveis de água nos evaporatórios em 1, 2 e 3 cm, e superestimativa nos níveis 5 e 6 cm. De acordo com o que está apresentado na Figura 4, o nível de água no evaporatório em 4 cm (N4) foi o que melhor se ajustou à estimativa da evapotranspiração de referência, considerando-se o método de Penman-Monteith - FAO 56 como padrão.

Com os resultados obtidos utilizando-se o Irrigâmetro operando com o nível de água em 6 cm, foi obtida uma linha de tendência que praticamente acompanhou, paralelamente, a linha de valores 1:1, ou seja, com inclinação semelhante, contudo, são valores superestimados de evapotranspiração de referência.

Valores de  $K_f$  subestimados ( $K_f < 1$ ) e superestimados ( $K_f > 1$ ) têm sido usados para estimar diretamente a evapotranspiração da cultura, utilizando o aparelho, com correspondência para valores de  $K_c$  menores e maiores que a unidade, respectivamente (CAIXETA, 2009). Na prática, quando se deseja trabalhar com culturas com valores de  $K_c$  menores que 1, utiliza-se o Irrigâmetro

ajustado para valores de  $K_f$  menores que 1. Já para valores de  $K_c$  maiores que 1, utiliza-se o aparelho ajustado para valores de  $K_f$  também maiores que 1.

As comparações dos níveis de água no evaporatório nos períodos de três, cinco e sete dias seguiram a mesma metodologia estatística aplicada na escala diária, sendo apresentadas nos Quadros 4, 5 e 6, respectivamente.

Nos Quadros 4, 5 e 6, observa-se que o agrupamento da evapotranspiração em intervalos de três, cinco e sete dias, respectivamente, não resultou em aumento do coeficiente de determinação, mas apresentou redução do índice de concordância e, principalmente, do erro padrão da estimativa, com valores mais próximos de zero, na maioria das profundidades estudadas, comparativamente ao intervalo de tempo diário. Um dos motivos desse comportamento pode ser o fato de se trabalhar com valores médios de evapotranspiração, ou seja, médias de três, cinco e sete dias. Ao adotar esse procedimento, a diferença entre os valores de evapotranspiração do Irrigâmetro e os valores calculados pelo método de Penman-Monteith FAO 56 diminui.

**Quadro 4.** Valores médios do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_f$ ), erro padrão da estimativa (EPE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente angular (b) e valores de  $ETc_p$ , em intervalos de três dias

Nível (cm)	$K_f$	EPE	d	$r^2$	b	$ETc_p$ (mm d <sup>-1</sup> )
1	0,52	2,27	0,42	0,28	0,38	2,30
2	0,62	1,88	0,47	0,23	0,40	2,76
3	0,77	1,11	0,72	0,76	0,84	3,41
4	0,87	0,70	0,85	0,79	0,79	3,87
5	1,24	1,26	0,68	0,54	0,80	5,48
6	1,39	1,90	0,57	0,59	1,07	6,15

**Quadro 5.** Valores médios do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_f$ ), erro padrão da estimativa (EPE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente angular (b) e valores de  $ETc_p$ , em intervalos de cinco dias

Nível (cm)	$K_f$	EPE	d	$r^2$	b	$ETc_p$ (mm d <sup>-1</sup> )
1	0,52	2,27	0,39	0,28	0,38	2,29
2	0,62	1,87	0,44	0,23	0,40	2,74
3	0,77	1,12	0,68	0,75	0,86	3,40
4	0,87	0,70	0,81	0,75	0,76	3,86
5	1,24	1,23	0,64	0,49	0,72	5,48
6	1,39	1,86	0,53	0,57	1,00	6,14

**Quadro 6.** Valores médios do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_1$ ), erro padrão da estimativa (EPE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente angular (b) e valores de  $ETc_1$ , em intervalos de sete dias

Nível (cm)	$K_1$	EPE	d	$r^2$	b	$ETc_1$ (mm d <sup>-1</sup> )
1	0,52	2,26	0,35	0,20	0,33	2,29
2	0,62	1,82	0,40	0,22	0,41	2,75
3	0,77	1,08	0,65	0,79	0,90	3,41
4	0,87	0,66	0,80	0,76	0,80	3,86
5	1,24	1,22	0,56	0,41	0,65	5,47
6	1,39	1,85	0,47	0,55	1,01	6,13

Nos agrupamentos de três, cinco e sete dias, o Irrigâmetro, operando com os níveis de água nos evaporatórios 3 e 4 cm, proporcionou menor erro padrão da estimativa e maior índice de concordância, indicando melhor desempenho para a estimativa da  $ET_0$ , diante dos demais níveis estudados. O agrupamento dos valores em períodos maiores não representou melhoria significativa na estimativa da  $ET_0$ .

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 elementos climáticos, a radiação solar é o elemento de maior importância na demanda evaporativa da atmosfera.

A influência isolada dos elementos meteorológicos na evaporação de superfícies de água livre, como nos tanques evaporímetros, é difícil 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 interrelacionam com as condições climáticas, dificultando a medição da sua influência na evaporação.

Antes de submeter as matrizes dos coeficientes de correlação, avaliou-se a multicolinearidade, não sendo encontrados níveis severos nem moderados em nenhuma variável, para todos os meses do experimento. Em seguida, os coeficientes de

correlação foram desdobrados em efeitos diretos e indiretos para avaliar o efeito das variáveis explicativas sobre a variável principal, através do método da análise de trilha. Desdobraram-se então as correlações de cada variável de maneira independente, ou seja, os elementos climatológicos temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação, com a variável dependente evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, para o período diário, em seus efeitos diretos e indiretos, para verificar a influência de cada elemento climatológico sobre essa evapotranspiração.

Não se identificou tendência clara de correlação ao longo de todo o período experimental. Entretanto, pode-se notar que em todos os níveis de água no evaporatório, para os meses de setembro e outubro, os elementos climatológicos que apresentaram maior correlação com a evapotranspiração estimada utilizando-se o Irrigâmetro foram umidade relativa, radiação, temperatura máxima e temperatura mínima. Isso se deve ao fato de nos referidos meses tais variáveis se comportarem de forma mais propícia à evapotranspiração, ou seja, a umidade relativa do ar baixa e a radiação solar e as temperaturas máxima e mínima mais elevadas. Comportamento semelhante ocorreu no mês de janeiro, mas apenas para os níveis N1 e N2 de água no evaporatório, sendo para os demais níveis as correlações totais não significativas pelo teste t. Por outro lado, em todos os meses da pesquisa, a menor correlação com a variável principal foi obtida pelo elemento climatológico velocidade do vento, sendo não significativa pelo teste t, de maneira que se apresentou como a variável menos importante

no processo evaporativo do Irrigâmetro. Caixeta (2009), em seu estudo, descreveu que a temperatura mínima apresentou a menor correlação com a variável principal, enquanto a velocidade do vento apresentou correlação não significativa. Isso pode ser em decorrência da bordadura do evaporatório, que tem uma aerodinâmica que reduz o efeito da ação do vento.

No mês de agosto, apenas a variável umidade relativa do ar apresentou correlação significativa com a variável principal, tendo efeito direto elevado apenas nos níveis N1, N2, N5 e N6. As estimativas dos efeitos diretos elevados e de sinais iguais aos dos coeficientes de correlação total indicaram que a umidade relativa foi a principal variável na decomposição da evapotranspiração estimada utilizando-se o Irrigâmetro, operando nos níveis N1, N2, N5 e N6. Isso evidencia que, para esse mês, a variação na umidade relativa implica em mudanças diretas na evapotranspiração estimada utilizando-se o Irrigâmetro (ET), sendo assim, essa variável é o principal elemento climatológico na tentativa de explicar a variável dependente (ET) para o mês de agosto.

As estimativas dos efeitos diretos elevados e de sinais iguais aos dos coeficientes de correlação total, em todos os níveis de água no evaporatório, indicaram que as variáveis temperatura mínima e umidade relativa foram os principais determinantes na composição da evapotranspiração para o mês de setembro. No mês de outubro, as estimativas dos efeitos diretos elevados e de sinais iguais aos dos coeficientes de correlação total indicaram que as variáveis temperatura máxima e umidade relativa foram os principais determinantes na composição da variável principal. Assim, a variação na umidade relativa e temperatura mínima, para o mês de setembro e, umidade relativa e temperatura máxima, para o mês de outubro, implica mudanças diretas na evapotranspiração estimada utilizando-se o Irrigâmetro, sendo as variáveis climatológicas principais na tentativa de explicar a variável dependente (ET) para esses meses.

Os efeitos indiretos da variável temperatura máxima via temperatura mínima, da variável temperatura mínima via temperatura máxima e da variável umidade relativa via temperatura máxima e via temperatura mínima, destacaram-se

como os mais associados na tentativa de explicar a evapotranspiração em todos os níveis de água no evaporatório para os meses de setembro e outubro. O coeficiente de correlação do efeito direto da temperatura máxima apresentou sinal positivo, igual ao da correlação total para a mesma variável, indicando que há relação direta entre a variável dependente evapotranspiração estimada utilizando-se o Irrigâmetro e a variável explicativa temperatura máxima, para o mês de outubro. O mesmo ocorre para a variável temperatura mínima no mês de setembro.

No mês de janeiro, as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa e radiação apresentaram correlação significativa com a variável principal para os níveis N1 e N2 de água no evaporatório do Irrigâmetro. Contudo, percebem-se os efeitos indiretos da temperatura máxima, da temperatura mínima e da radiação via umidade relativa, que foram elevados e maiores que o efeito da variável residual. Percebe-se também que o efeito direto da umidade relativa foi elevado e superior ao efeito da variável residual, de maneira que ocorrendo mudanças na variável umidade relativa implica mudanças diretas na evapotranspiração estimada utilizando-se o Irrigâmetro. Portanto, essa variável é o principal elemento climatológico na tentativa de explicar a variável dependente (ET) para o mês de janeiro.

No mês de maio, percebe-se que apenas o nível N4, correspondente a 4 cm de água no evaporatório do Irrigâmetro, apresentou correlação significativa pelo teste t, a 1% de significância. No entanto, na decomposição da variável temperatura máxima, nota-se efeito indireto elevado, maior que o efeito da variável residual, via temperatura mínima, sobre a evapotranspiração do Irrigâmetro. Na decomposição da variável temperatura mínima, percebe-se domínio do efeito direto sobre a evapotranspiração, sendo também maior que o efeito da variável residual. Isso mostra que mudanças na variável temperatura mínima implicam mudanças diretas na evapotranspiração estimada utilizando-se o Irrigâmetro, sendo assim, essa variável é o principal elemento climatológico na tentativa de explicar a variável dependente (ET) para o mês de maio.

Nos meses de novembro, dezembro, fevereiro,

março e abril, não foram observadas correlações significativas pelo teste t, a 1% de significância, em nenhum dos níveis de água no evaporatório do Irrigâmetro, não sendo possível, então, descrever a ação das variáveis climatológicas.

## CONCLUSÕES

- O Irrigâmetro apresentou bom desempenho proporcionando a estimativa da evapotranspiração de referência nas condições climáticas da região do Alto Paranaíba-MG quando foi operado com os níveis de água no evaporatório em 2,5 e 4,1 cm, tendo para tanto um nível diferente em cada mês, para a melhor estimativa da evapotranspiração de referência;
- O coeficiente do Irrigâmetro aumentou exponencialmente com a elevação do nível da água dentro do evaporatório;
- Os elementos climatológicos que apresentaram maior correlação com a estimativa da evapotranspiração obtida utilizando-se o Irrigâmetro foram a umidade relativa do ar, para os meses de agosto e janeiro, temperatura mínima e umidade relativa do ar, para o mês de setembro, temperatura máxima e umidade relativa do ar, para o mês de outubro, e temperatura mínima, para o mês de maio;
- Na evapotranspiração estimada utilizando-se o Irrigâmetro, as menores correlações com a variável principal foram obtidas com a variável velocidade do vento, sendo essa correlação não significativa;
- Nos meses de novembro, dezembro, fevereiro, março e abril, não se verificou nenhuma correlação significativa entre as variáveis independentes e a evapotranspiração, variável principal;
- Uma limitação do uso do Irrigâmetro é a necessidade de ajustes regionais, no entanto, para trabalhos futuros, pode-se estudar o uso de equações que tenham como variáveis os elementos do clima para os ajustes regionais do aparelho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - Agência Nacional de Águas. “**O Estado da Arte da Agricultura Irrigada e as Modernas Tecnologias no Uso Racional da Água na Irrigação**”. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/palestras/AntonioFelix/FelixANA.pdf>>. Acesso em 16 maio 2009.

ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; BORNAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, Madison, v.81, p.650-662, 1989.

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

CAIXETA, S.P. **Efeitos de elementos meteorológicos na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro nas condições climáticas da Zona da Mata Mineira**. 2009. 52f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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

CHRISTOFIDIS, D. “Água de irrigação e segurança alimentar”, *Revista ITEM* nº 77, 1º TRIM. 2008, p.16 – 21, Belo Horizonte, ISSN 0102-115x.

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

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

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**. 2002. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz

de Queiroz, Piracicaba, SP.

OLIVEIRA, E.M.; OLIVEIRA, R.A.; TAGLIAFERRE, C.; SEDYAMA, G.C. Ajuste do Irrigâmetro para estimar a evapotranspiração da cultura nos seus diversos estádios de desenvolvimento. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2007, Bonito-MS. **Anais...** Bonito: SBEA, 2007b. CD-ROM.

OLIVEIRA, R.A.; RAMOS, M.M. Manual do Irrigâmetro. Viçosa, MG: UFV, 2008. 144p.

**GENES Programa para Análise e Processamento de Dados Baseado em Modelos de Genética e Estatística Experimental**, versão 2007.0.0: Fundação Arthur Bernardes - UFV - Viçosa, 2007.

SEDIYAMA, G. C. **Necessidade de água para os**

**cultivos**. Brasília: ABEAS, 1996. 176p.

TAGLIAFERRE, C. **Desempenho do irrigâmetro e de dois minievaporímetros para estimativa da evapotranspiração de referência**. 2006. 99f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PAULA, A. L. T. **Tecnologia do irrigâmetro e da válvula intermitente para aspersor aplicada no perímetro irrigado do Jaíba**. 2009. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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.