

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA**

ALBERTO GARCIA DA CUNHA MACCHERONI

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA PARA MONTE ALEGRE DE MINAS-MG**

**Uberlândia
Maio - 2008**

ALBERTO GARCIA DA CUNHA MACCHERONI

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA PARA MONTE ALEGRE DE MINAS-MG**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Agronomia, da Universidade Federal de Uberlândia, para obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Hudson de Paula Carvalho

**Uberlândia – MG
Maio - 2008**

ALBERTO GARCIA DA CUNHA MACCHERONI

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA PARA MONTE ALEGRE DE MINAS-MG**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao curso de Agronomia, da Universidade
Federal de Uberlândia, para obtenção do
grau de Engenheiro Agrônomo.

Aprovado pela banca examinadora em 27/05/2008

Prof. Dra. Maria Alice Vieira
Membro da Banca

Prof. Dr. Reginaldo de Camargo
Membro da Banca

Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho
Orientador

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Monte Alegre de Minas – MG. Os dados meteorológicos necessários foram medidos no período compreendido entre 01/01/2002 à 31/12/2006, em uma estação meteorológica automática. Foram avaliados os métodos de Thornthwaite, Camargo, Priestley-Taylor e Hargreaves-Samani. Os valores estimados por esses métodos foram confrontados com aqueles obtidos pelo método de Penman-Monteith (Padrão FAO-1991), considerado padrão. Concluiu-se que nenhum dos métodos avaliados apresentaram altos níveis de correlação, indicando a impossibilidade de se utilizar esses métodos, para a determinação da evapotranspiração de referência na escala diária, para a região de Monte Alegre de Minas-MG; o melhor desempenho foi obtido pelo método de Priestley-Taylor, porém, com índice “c” de 0,60, considerado sofrível; o pior desempenho foi obtido pelo método de Hargreaves-Samani, considerado péssimo com índice “c” 0,25; os métodos de Thornthwaite e Camargo apresentaram desempenhos intermediários entre os quatro métodos avaliados, com índice “c” 0,40 e 0,27 respectivamente.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	5
2 REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 Evapotranspiração	7
2.3 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência	9
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	10
3.1 Local de estudo e dados climáticos	11
3.2 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência avaliados	11
3.3 Metodologia estatística.....	15
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5 CONCLUSÕES	22
REFERÊNCIAS	23

1 INTRODUÇÃO

A água é o elemento primordial para grandes produções das culturas, já que representa 90 a 95% da constituição de algumas plantas quando jovens. Esse fluido tem papel fundamental para todos os seres vivos, isso porque além de ser solvente, através da qual gases, minerais e outros solutos entram nas células e movem-se pela planta, tem também a função de regulador térmico, agindo tanto no resfriamento quanto na distribuição e manutenção do calor, além de ser indispensável para todo metabolismo. Apesar de o planeta ser formado por dois terços de água, na verdade menos de 1% de todo esse montante existente está disponível, já que apenas 2,7% é doce (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO, 2008).

A água vem se tornando cada vez mais escassa à medida que a população, a indústria e a agricultura se expandem. Embora os usos da água variem de país para país, a agricultura é a atividade que mais consome água, sendo responsável por 69% do total, a indústria por 21% e o uso doméstico por 10% (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO, 2008). As previsões indicam que em 2050 a população mundial deverá atingir nove bilhões de habitantes, o que aumenta a necessidade de um controle maior na utilização desse bem, principalmente, pela agricultura, sua maior consumidora. Grande parte da água utilizada na agricultura é desperdiçada, principalmente porque não são conhecidos nem qualificados os componentes do balanço hídrico das culturas.

A evaporação é o processo físico pelo qual um líquido passa para o estado gasoso. A evaporação de água na atmosfera ocorre de oceanos, lagos, rios, do solo e da vegetação úmida (evaporação do orvalho e da chuva interceptada). Transpiração é a perda de água na forma de vapor, pelas plantas e ocorre predominantemente pelas folhas. Todavia, em plantas lenhosas esse processo possa ser verificado também nas lenticelas da casca do tronco. Ao processo simultâneo de transferência de água para atmosfera por evaporação da água do solo e por transpiração das plantas dá-se o nome de evapotranspiração (ET).

A quantificação da evapotranspiração das plantas é de suma importância para a irrigação, uma vez que essa tecnologia se baseia, em princípios gerais, na reposição da água ao solo que a planta extraiu. Além disso, a ET é de grande valia na estimativa da produtividade potencial de culturas e na definição de plantas mais eficientes na utilização da água.

Para a quantificação da água utilizada por uma cultura torna-se necessário o conhecimento da evapotranspiração potencial (ETP) ou evapotranspiração de referência (ET_o). Existem diversos métodos para a estimativa da evapotranspiração descritos na literatura, destacando-se os diretos (através de aparelhos para medi-la diretamente, como lisímetros de pesagem ou drenagem) e indiretos.

Os métodos indiretos se caracterizam pelo uso de equações empíricas, ou modelos matemáticos, que necessitam de dados climáticos para sua aplicação. Segundo Mello (1998) estes métodos por se tratarem de estimativa, apresentam inúmeros problemas de precisão, principalmente pela falta de ajuste dos coeficientes dos modelos especificamente para a região de interesse, além dos problemas de erro de leitura e acurácia dos sensores utilizados. Não obstante, torna-se necessário a avaliação desses métodos, no intuito de identificar aqueles com melhor desempenho para a região de interesse.

Os lisímetros de pesagem são onerosos e de difícil instalação quase sempre restringindo seu uso às instituições de pesquisa. Isso faz com que a maioria dos agricultores utilize os métodos indiretos para cálculo da evapotranspiração.

Não muitos são os experimentos relatados para a região do Triângulo Mineiro sobre o desempenho de métodos de evapotranspiração, sendo que estes estudos se tornam de grande importância, devido a forte atividade agrícola verificada na região.

Em diferentes partes do Brasil e do mundo, vem-se avaliando o desempenho de diferentes métodos de estimativa da ET_o. As conclusões variam muito segundo a condição experimental, o que dificulta ao usuário decidir sobre a conveniência de utilizar determinado método (PEREIRA et al., 1996).

Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Monte Alegre de Minas – MG.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evapotranspiração

Para saber a quantidade de água que seria utilizada por uma cultura faz-se necessário o conhecimento da evapotranspiração pontencial (ETP) ou de referência (ETo). De acordo com Pereira et al. (2002), a ETo é a quantidade de água que seria utilizada por uma extensa superfície vegetada com grama, com altura entre 8 e 15 cm (índice de área foliar – IAF = 2,88), em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem restrição hídrica.

Ainda segundo os autores, conceitualmente a ETo é limitada apenas pelo balanço vertical de energia, ou seja, pelas condições do ambiente local, podendo ser estimada por fórmulas teórico-empíricas desenvolvidas e testadas para várias condições climáticas. A evapotranspiração nessas condições é tomada como referência quando se quer conhecer a evapotranspiração de uma cultura em condições não padrão, ou seja, é um valor indicativo da demanda evapotranspirativa da atmosfera de um local, num dado período de tempo.

A evapotranspiração potencial é um elemento meteorológico fundamental, assim como a precipitação pluvial. Teoricamente, ela representa a chuva necessária para não faltar nem sobrar água no solo. Com o balanço contábil entre esses dois elementos opostos pode-se caracterizar bem o fator umidade do clima e estimar a umidade disponível no solo, através do balanço hídrico climático. Como a evapotranspiração potencial é função do balanço de energia solar no terreno, constitui também um índice de eficiência térmica da região, sendo expressa normalmente em milímetros de evaporação equivalente. Sua medição não é simples, mas pode ser rapidamente estimada em função de outros elementos obtidos nos postos meteorológicos.

Vários métodos têm sido desenvolvidos para a estimativa da evapotranspiração de referência em todo o mundo. Vários desses métodos apresentam boa aceitação, enquanto outros são muitos criticados ou até desprezados. Poucos no entanto, são aplicáveis para uma grande diversidade de condições climáticas (PEREIRA et al., 1996). Os critérios de rejeição, muitas vezes, não são claros ou acham-se associados à má interpretação do conceito de evapotranspiração de referência e ao uso de evapotranspirômetros mal expostos, sem a devida área tampão.

A escolha de um método de estimativa da ETo depende de uma série de fatores, tais como a disponibilidade de dados meteorológicos e a escala de tempo desejada e condições climáticas nas quais o método foi desenvolvido.(PEREIRA et. al., 2002).

Os métodos mais empregados na estimativa da ETo são os indiretos (também conhecidos como métodos empíricos) que baseiam-se em dados meteorológicos muitas vezes, não disponíveis. Por outro lado, os métodos diretos da estimativa, como os lisímetros de pesagem, que proporcionam resultados mais confiáveis, são na maioria das vezes utilizados apenas para finalidades científicas, tendo em vista a necessidade de implantação de uma estrutura física muitas vezes onerosa (CARVALHO et. al., 2006).

Segundo Smith (1991) a FAO recomenda que os métodos empíricos de estimativas da ETo, sejam calibrados e validados para outras regiões, sendo a equação de Penman-Monteith a referência padrão para esses ajustes.

Vários autores encontraram boa correlação entre dados medidos em lisímetros e estimados pela equação de Penman-Monteith, como: Allen (1986), Maggiotto (1996), Sentelhas (1998), Pereira (1998), Camargo e Sentelhas (1997) Jensen et al. (1990), Ribeiro (1996), Hussien (1999) e Azevedo (1999).

A equação de Penman-Monteith é aceita universalmente para estimativas horárias e diárias da evapotranspiração (ALEXANDRIS; KERKIDES, 2003). Segundo os autores a mesma pode ser usada para fins práticos de pesquisa e diversos pesquisadores a recomendam, especialmente para períodos curtos de tempo. Diversos trabalhos têm sido feitos visando correlacionar medidas de evapotranspiração em lisímetros com as estimadas pelo método de Penman-Monteith, que apesar de ser adotado pela FAO como o método padrão de estimativa da ETo na escala diária, exigem grande número de variáveis meteorológicas e, por isso, tem aplicação limitada, somente sendo utilizados quando há disponibilidade de todos os dados necessários, o que, na prática, só é possível quando se dispõe de estações meteorológicas (JÚNIOR et. al.2003).

Como alternativa para solucionar o problema, destaca-se o uso de métodos empíricos de estimativa da ETo, os quais, por serem desenvolvidos e calibrados localmente, não podem ter aplicação universal, porém apresentam melhores resultados do que aqueles mais genéricos, além de fisicamente mais reais (JÚNIOR et. al.2003).

Segundo Sentelhas (2001), os métodos mais utilizados, seja pela simplicidade ou grau de confiabilidade, são os de Thornthwaite, Camargo, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor e Penman-Monteith (Padrão FAO – 1991). Muitos outros métodos são apresentados na

literatura, mas não são tão utilizados exatamente por terem sido desenvolvidos para condições climáticas e ou agronômicas específicas.

2.3 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência

Muitas equações para a estimativa da evapotranspiração de referência tem sido avaliadas para diversas regiões do Brasil. Para o Estado de São Paulo, Camargo e Sentelhas (1997), testaram as equações de Blaney-Criddle, Blaney-Criddle modificado, Camargo, Hargreaves 74, Hargreaves 76, Hargreaves modificado, Ivanov, Jensen e Haise, Linacre, Makking, Penman, Penman-Monteith, Penman-Villa Nova e Ometo, Penman-Frère, Priestley-Taylor, Radiação Solar, Tanner e Pelton, Thornthwaite, Thornthwaite índice T, Turk e Ivanov. Segundo os autores as que apresentaram melhor resultado foram as de Camargo, Thornthwaite, Thornthwaite índice T e Priestley-Taylor. Dessas, exceto Priestley-Taylor, utilizam somente a temperatura do ar como variável meteorológica independente, sendo assim de fácil uso. Dentre todos os métodos avaliados o de Ivanov teve o pior desempenho.

Ainda no estado de São Paulo, Camargo e Sentelhas (1996), avaliaram os métodos de Hargreaves e de Hargreaves-Samani, comparando os dados medidos em lisímetro de pesagem (padrão) com os dados estimados, e concluíram que esses modelos superestimaram as leituras em relação ao padrão, não se mostrando viáveis para o estado. Não obstante, propuseram uma nova equação (Hargreaves modificado) que mostrou grande concordância com os valores estimados e medidos.

Nessa mesma linha, Takay et al. (2008), avaliaram para Uberaba-MG os métodos de estimativa da ETP de Penman-Piche e Penman-Monteith (Padrão FAO – 1991), sendo este último considerado como padrão. Os autores verificaram que é possível estimar a ETo de maneira satisfatória através da evaporação medida pelo evaporímetro de Piche. Ainda segundo os autores, a precisão desse instrumento está diretamente ligada à umidade do ar, apresentando uma diminuição em sua precisão nos meses de baixa umidade relativa do ar.

Conceição e Mandelli (2005) avaliaram os métodos, Hargreaves-Samani, Thornthwaite, Thornthwaite modificado, Camargo, Makking e da Radiação, comparando os resultados com o método Penman-Monteith (Padrão FAO – 1991) na região de Bento Gonçalves – RS. Os autores verificaram que os métodos de Makking e da Radiação

proporcionaram melhores estimativas da ETo, por levarem em consideração a radiação solar incidente além da temperatura do ar, sendo que os outros métodos avaliados levam em conta somente a temperatura do ar. Eles verificaram que o método de Hargreaves-Samani apresentou desempenho muito bom, o que era inesperado pelo fato dele ter sido ajustado para condições semi-áridas da Califórnia. Os autores atribuíram esse resultado ao fato de que as diferenças entre as temperaturas máxima e mínima nele usadas, refletem, de certa forma, as condições de umidade do ar da região, pois em geral, quanto maior a umidade relativa menor a amplitude térmica.

Nessa mesma linha de trabalho, Carvalho et al. (2006) avaliaram em Seropédica-RJ diferentes métodos para a estimativa da ETo. Eles correlacionaram os dados obtidos pelos métodos de Penman-Monteith (FAO-56), Hargreaves-Samani e Tanque Classe A, com os medidos pelos lisímetros de pesagem e concluíram que o método do Tanque Classe A se mostrou adequado para a estimativa da ETo, no período analisado. Concluíram também, que os valores estimados pelo método de Penman-Monteith (FAO-56) estão bem correlacionados com os obtidos pelo lisímetro de pesagem. Não obstante, o método de Hargreaves-Samani superestimou sistematicamente os valores de ETo, não sendo portanto, satisfatório para a estimativa de valores diários de ETo em Seropédica-RJ.

Medeiros (2002) verificou que os dados medidos em lisímetros de pesagem em Paraipaba-CE se ajustaram de forma regular aos valores de ETo estimados por Penman-Monteith (FAO-56), apresentando erros aleatórios na estimativa da ordem de 0,504, 0,216 e 0,198 mm dia⁻¹ para as escalas diária, quinquidial e decendial, respectivamente. No entanto, segundo autor, o emprego deste método se torna restrito devido à disponibilidade de dados meteorológicos, favorecendo o uso de métodos mais simples.

Fietz et. al. (2005) avaliaram seis métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, na escala diária para as condições da região de Dourados-MS. A ETo foi medida por lisímetro de pesagem e os dados meteorológicos coletados por uma estação meteorológica automática instalada junto ao lisímetro. O modelo de Penman-Monteith foi o que estimou mais satisfatoriamente a ETo, em comparação com dados medidos pelo lisímetro. Os métodos de Priestley-Taylor e Tanque Classe A também apresentaram um desempenho muito bom. O modelo de Hargreaves-Samani foi superior ao de Makking que proporcionou a maiores superestimativas da ETo. O método de Camargo teve o pior desempenho, tendendo a subestimar a ETo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de estudo e dados climáticos

O trabalho foi realizado com dados meteorológicos medidos na Fazenda Gaia, pertencente ao Grupo Algar, localizada a 18° 45' 32'' S, 48° 45' 18'' W e 842 m de altitude, em Monte Alegre-MG. Os referidos dados foram coletados em estação climatológica automática da marca Davis®. Os elementos meteorológicos medidos foram a temperatura média, temperatura máxima, temperatura mínima, radiação solar global, velocidade do vento e umidade relativa do ar.

As coletas foram efetuadas no período de 01/01/2002 à 31/12/2006, sendo que a estação registrava esses dados meteorológicos de 30 em 30 minutos, ou seja cada dia havia 48 registros dos elementos meteorológicos necessários. Através destes, realizou-se a média diária dos elementos de temperatura média, temperatura máxima, temperatura mínima, velocidade do vento e umidade, e integração da radiação solar global diária.

Foram descartadas as datas que os dados estavam incompletos ou errados, ou ainda os dias que não houve registro, resultando no total de 1668 dias de avaliação.

3.2 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência avaliados

Os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência avaliados foram, Camargo (Eq. 1), Thornthwaite (Eq. 2), Hargreaves-Samani (Eq. 3), Priestley-Taylor (Eq. 4), citadas conforme Pereira et al. (2002) e Penman-Monteith (Padrão FAO – 1991) (Eq. 5), conforme Allen et al. (1998).

- **Método de Camargo**

$$ET_o = 0,01 \cdot Q_o \cdot T \cdot ND \dots\dots\dots Eq. 1$$

Em que:

ETo = evapotranspiração de referência, mm dia⁻¹;

Qo = irradiância solar global extraterrestre, mm dia⁻¹;

T = temperatura média do ar, °C;

ND = número de dias do período considerado.

• **Método de Thornthwaite**

$$ETp = 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{Tn}{I} \right)^a \quad \text{para } 0 \leq Tn < 26,5 \text{ °C} \dots\dots\dots \text{Eq. 2}$$

Em que:

ETp = evapotranspiração potencial padrão, mm dia⁻¹;

Tn = temperatura média do mês, °C;

I = índice que expressa o nível de calor disponível na região, °C.

No caso de $Tn \geq 26,5 \text{ °C}$ a ETp foi calculada pela Equação 2.1.

$$ETp = -415,85 + 32,24 \cdot Tn - 0,43 \cdot Tn^2 \quad \text{para } Tn \geq 26,5 \text{ °C} \dots\dots\dots \text{Eq. 2.1}$$

O valor do índice I foi calculado da seguinte forma (Eq. 2.2):

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 \cdot Tn)^{1,514} \dots\dots\dots \text{Eq. 2.2}$$

O expoente a, da equação 2, sendo função de I, também é um índice térmico regional, e foi calculado por função polinomial (Eq 2.3).

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \dots\dots\dots \text{Eq. 2.3}$$

Os coeficientes I e a, calculados com as normais climatológicas, são características da região se tornam-se constantes, sendo independentes do ano de estimativa de ETp.

O valor de ETp calculado, por definição, representa o total mensal da evapotranspiração que ocorreria naquelas condições térmicas, mas para um mês padrão de 30 dias, em que cada dia teria 12 horas de fotoperíodo. Portanto, para se obter a ETo do mês correspondente, esse valor de ETp foi corrigido em função do número real de dias e do fotoperíodo do mês ou seja:

$$ETo = ETp \cdot Cor \dots\dots\dots Eq. 2.4$$

$$Cor = \left(\frac{ND}{30}\right) \cdot \left(\frac{N}{12}\right) \dots\dots\dots Eq. 2.5$$

Em que:

ND = número de dias do mês em questão;

N = fotoperíodo médio daquele mês, h.

- **Método de Hargreaves-Samani**

$$ETo = 0,0023 \cdot Qo \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot (T_{med} + 17,8) \dots\dots\dots Eq. 3$$

Em que:

ETo = evapotranspiração de referência, mm dia⁻¹;

Qo = irradiância solar global extraterrestre, mm dia⁻¹;

Tmax = temperatura máxima do ar, °C;

Tmin = temperatura mínima do ar, °C;

Tmed = temperatura média do ar, °C.

- **Método de Priestley-Taylor**

$$ETo = 1,26 \cdot W \cdot \frac{(Rn - G)}{2,45} \dots\dots\dots Eq. 4$$

Em que:

E_{To} = evapotranspiração de referência, mm dia^{-1} ;

R_n = radiação líquida total diária, $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$;

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

W = fator de ponderação dependente da temperatura e do coeficiente psicrométrico.

Sendo que W foi calculado pelas Equações 4.1 e 4.2.

$$W = 0,407 + 0,0145 \cdot T \quad (0 \text{ } ^\circ\text{C} < T < 16 \text{ } ^\circ\text{C}) \dots\dots\dots \text{Eq. 4.1}$$

$$W = 0,483 + 0,01 \cdot T \quad (16,1 \text{ } ^\circ\text{C} < T < 32 \text{ } ^\circ\text{C}) \dots\dots\dots \text{Eq. 4.2}$$

Caso G não seja medido, adota-se uma fração de R_n como representativa desse fluxo, ou seja, $G = f R_n$, sendo $0 \leq f \leq 0,1$ para gramado (condição de ETP). O termo G foi calculado pela Equação 4.3.

$$G = 0,38 \cdot (T_d - T_{-3d}) \dots\dots\dots \text{Eq. 4.3}$$

Em que:

T_d = temperatura média do ar do dia em questão, $^\circ\text{C}$;

T_{-3d} = temperatura média do ar dos 3 dias anteriores, $^\circ\text{C}$.

- **Método de Penman-Monteith (Padrão FAO – 1991)**

$$E_{To} = \frac{0,408 \cdot s \cdot (R_n - G) + \frac{\gamma \cdot 900 \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{T + 273}}{s + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \dots\dots\dots \text{Eq. 5}$$

Em que:

E_{To} = evapotranspiração de referência, mm dia^{-1} ;

R_n = radiação líquida total diária, $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$;

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

U_2 = velocidade do vento a medido a dois metros de altura, m s^{-1} ;

T = temperatura media do ar, °C;

γ = constante psicrométrica, 0,063 kPa °C⁻¹;

e_s = pressão de saturação de vapor, kPa;

e_a = pressão parcial de vapor, kPa;

s = é a declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar, kPa °C⁻¹.

A pressão de saturação de vapor foi estimada pela Equação 5.1.

$$e_s = 0,06108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5}{273,3+T}\right)} \dots\dots\dots \text{Eq. 5.1}$$

A pressão parcial de vapor foi estimada pela equação 5.2.

$$e_a = \frac{(e_s \cdot UR)}{100} \dots\dots\dots \text{Eq. 5.2}$$

A declividade da curva de pressão de vapor foi calculada pela equação 5.3.

$$s = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 273,3)^2} \dots\dots\dots \text{Eq. 5.3}$$

3.3 Metodologia estatística

Os valores de evapotranspiração potencial obtidos nos métodos de Camargo, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor e Thornthwaite, foram confrontados com os valores estimados pela equação de Penman-Monteith (Padrão FAO – 1991), através de índices estatísticos, conforme Camargo e Sentelhas (1996). Para tanto, foram calculados o índice de exatidão (WILLMOT et al., 1985) (Eq. 6), o coeficiente de correlação de Pearson (Eq. 7) e por último, o coeficiente de confiança ou desempenho (Eq. 8).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \dots\dots\dots \text{Eq. 6}$$

Em que:

d = índice de exatidão;

P_i = valor estimado;

O_i = valor observado;

O = média dos valores observados.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots \text{Eq. 7}$$

Onde, x₁, x₂, ..., x_n e y₁, y₁, ..., y_n são os valores medidos de ambas as variáveis. Os valores médios de x e y foram calculados, respectivamente, pelas Equações 7.1 e 7.2.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \dots\dots\dots 7.1$$

e

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \dots\dots\dots 7.2$$

Em que:

r = coeficiente de correlação de Pearson.

$$c = r \cdot d \dots\dots\dots \text{Eq. 8}$$

Em que:

c = índice de desempenho de Camargo, adimensional;

r = coeficiente de correlação de Pearson, adimensional;

d = índice de concordância de Willmott, adimensional

O critério adotado para interpretar o desempenho dos métodos pelo índice “c”, para as médias diárias da ETo, estão compilados na Tabela 1.

Tabela 1. Critério de interpretação do desempenho do método de estimativa da evapotranspiração, pelo índice “c” (CAMARGO; SENTELHAS, 1996).

Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 1, 2, 3 e 4 são apresentadas as correlações entre os dados de ETo estimados pelo método de Penman-Monteith (Padrão FAO - 1991) com os dados de ETo estimados pelos métodos de Thornthwaite, Camargo, Hargreaves-Samani e Priestley-Taylor, respectivamente.

Observa-se pela Tabela 2 e pelas Figuras 1, 2, 3 e 4 que o desempenho dos métodos foi pouco variável. Três métodos tiveram o desempenho sofrível como é caso dos métodos de Thornthwaite, Camargo e Hargreaves-Samani, os quais apresentaram índice “c” variando entre 0,25 e 0,40. O desempenho desses métodos pode ser melhor observado nas Figuras 1, 2 e 3, onde se verifica que os índices de exatidão “d” e correlação “r” também foram baixos.

O método de Camargo apresentou o pior índice de correlação, superestimando os valores de ETo mais baixos e subestimando a maior partes dos valores, principalmente nos meses mais secos. Resultado contrário foi observado por Camargo e Sentelhas (1997) para períodos mensais e por Medeiros (1998) para períodos quinquidiais. Não obstante, os dados obtidos pelo método de Camargo neste trabalho, corroboram com aqueles encontrados por Bonomo et al. (1998) também para Minas Gerais.

As estimativas geradas por Hargreaves-Samani apresentou o pior índice de exatidão entre todos os métodos avaliados. Ele subestimou todos os valores da ETo, oposto do encontrado por Pereira et al. (1997) no estado de São Paulo, no qual ele superestimou demasiadamente os valores. Explica-se isso, pelo fato deste método ter sido ajustado para as condições semi-áridas da Califórnia, diferente da região de Monte Alegre de Minas-MG, qual é considerado de clima úmido.

A metodologia proposta por Thornthwaite não obteve índices de desempenho e correlação altos, onde ambos os valores foram 0,63. Além disso, apresentaram tendência a subestimar a maior parte dos valores de ETo. Esse resultado era esperado uma vez que a equação foi desenvolvida para condições de climas úmidos, além de se basear apenas na temperatura média do ar, conforme observou Medeiros (2002). Resultados semelhantes foram obtidos por Amatya et al. (1992), que verificaram que dentre oito métodos utilizados para estimar a ETo em três localidades da Carolina do Norte (EUA), o de Thornthwaite foi o que teve correlação menor, quando comparada a ETo obtida pelo método padrão (lisímetro), porém com subestimativas dessa variável. Esses resultados diferem dos encontrados por Camargo e Sentelhas (1997), no estado de São Paulo, que observaram excelente desempenho

do método de Thornthwaite quando comparam a ETo estimada por este método, com os dados de lisímetros de drenagem nas escalas decendial e mensal.

O método de Priestley-Taylor apresentou o desempenho sofrível, como pode ser observado na Tabela 2. Mesmo com este desempenho ele foi aquele que apresentou melhor estimativa da ETo dos quatro métodos analisados. Conforme observaram Fietz et.al. (2005), esse resultado pode ter ocorrido devido a esse método utilizar valores de radiação líquida, elemento meteorológico fundamental na evapotranspiração, diferindo nesse aspecto das demais metodologias testadas. Como pode ser observado na Figura 4, o referido método apresentou índice de exatidão muito bom 0,84, mas com índice de correlação apenas bom, 0,72, fazendo com que o índice de desempenho apresentasse a classificação como “sofrível”.

Os resultados encontrados para esta região apresentaram baixos níveis de correlação, indicando a impossibilidade de se utilizar métodos empíricos, que exigem poucas variáveis climatológicas, para a determinação da evapotranspiração de referência em escala diária.

Por outro lado, espera-se um melhor ajuste se os resultados gerados pelos métodos testados forem estimados em escala mensal, uma vez que os valores extremos tendem a ser suavizados quando se trabalha com média de períodos mais longos.

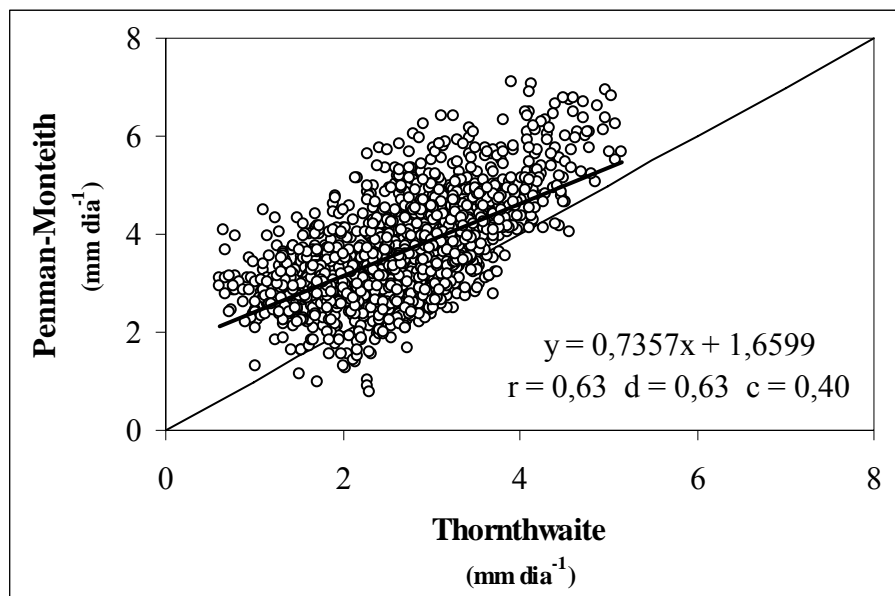


Figura 1. Análise de regressão entre a ETo diária estimada pelos métodos de Penman-Monteith (Padrão FAO - 1991), Thornthwaite e os resultados dos índices estatísticos calculados (r, d e c), no período de 2002 a 2006, em Monte Alegre de Minas – MG.

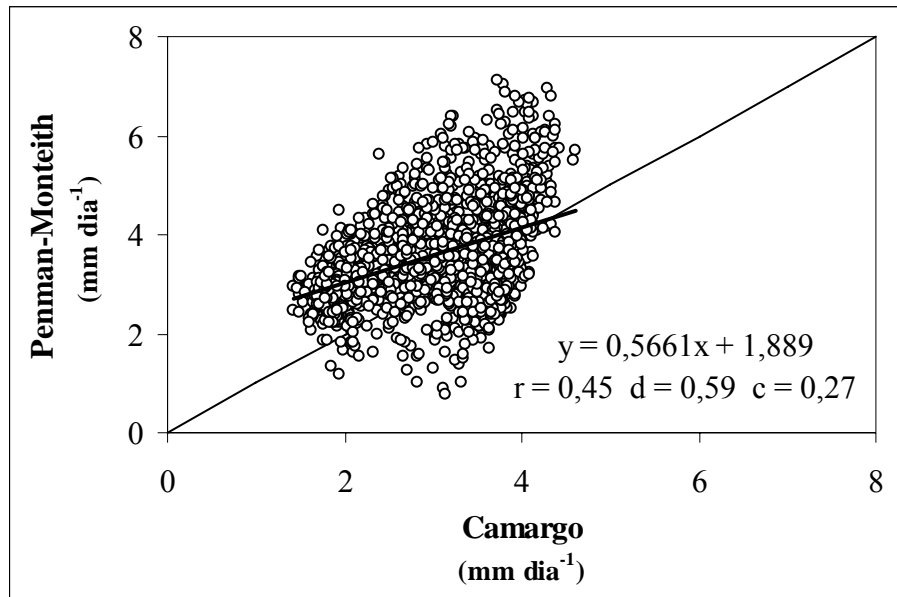


Figura 2. Análise de regressão entre a ETo diária estimada pelos métodos de Penman-Monteith (Padrão FAO - 1991), Camargo e os resultados dos índices estatísticos calculados (r, d e c), no período de 2002 a 2006, em Monte Alegre de Minas – MG.

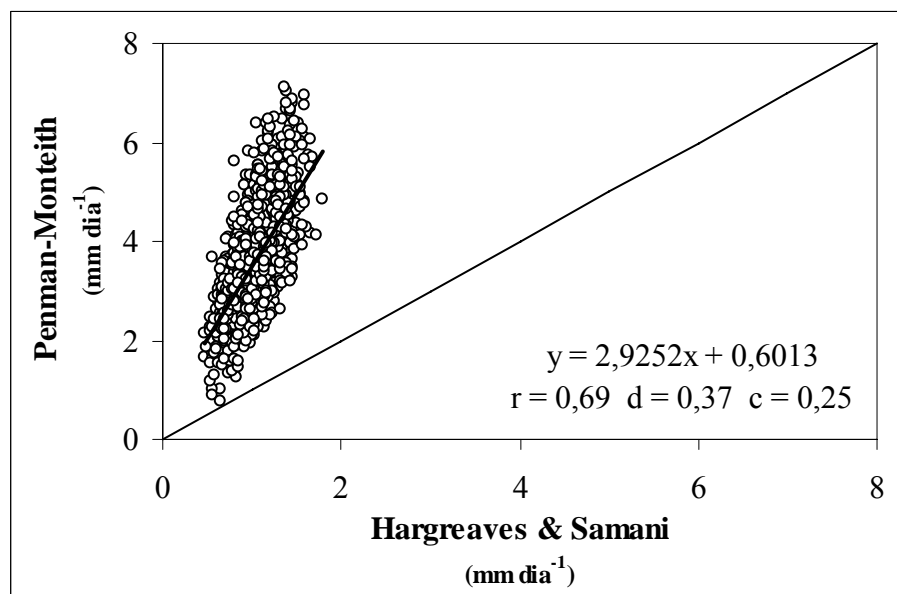


Figura 3. Análise de regressão entre a ETo diária estimada pelos métodos de Penman-Monteith (Padrão FAO - 1991), Hargreaves-Samani e os resultados dos índices estatísticos calculados (r, d e c), no período de 2002 a 2006, em Monte Alegre de Minas – MG.

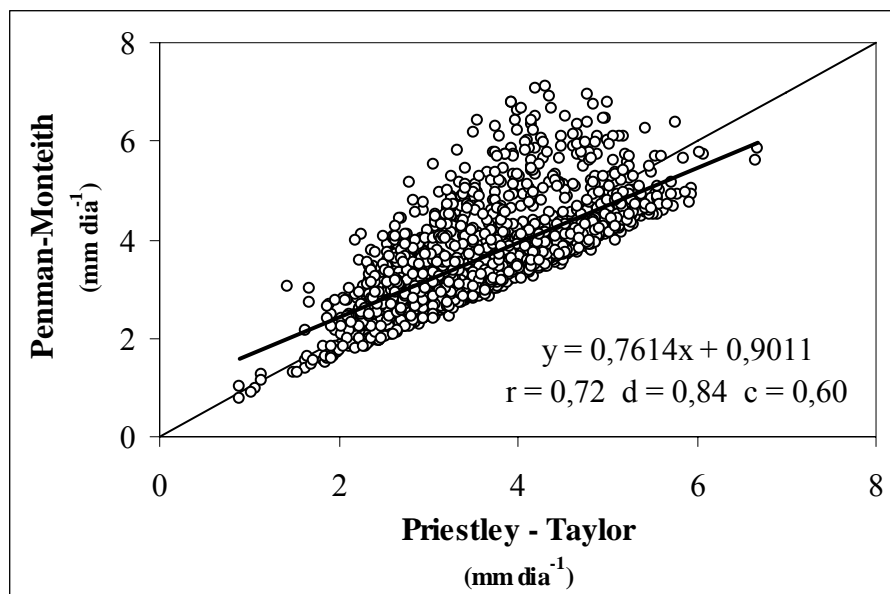


Figura 4. Análise de regressão entre a ETo diária estimada pelos métodos de Penman-Monteith (Padrão FAO - 1991), Priestley-Taylor e os resultados dos índices estatísticos calculados (r, d e c), no período de 2002 a 2006, em Monte Alegre de Minas – MG.

Tabela 2. Desempenho dos métodos de estimativa da ETo diária, segundo o índice de desempenho “c”, para Monte Alegre de Minas – MG.

Métodos	Índice “c”	Desempenho
Priestley-Taylor	0,60	Sofrível
Thornthwaite	0,40	Péssimo
Camargo	0,27	Péssimo
Hargreaves-Samani	0,25	Péssimo

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

1. Nenhum dos métodos avaliados apresentaram altos níveis de correlação, indicando a impossibilidade de se utilizar esses métodos, para a determinação da evapotranspiração de referência na escala diária, para a região de Monte Alegre de Minas-MG.
2. O melhor desempenho foi obtido pelo método de Priestley-Taylor, porém, com índice “c” de 0,60, considerado sofrível;
3. O pior desempenho foi obtido pelo método de Hargreaves-Samani, considerado péssimo com índice “c” 0,25;
4. Os métodos de Thornthwaite e Camargo apresentaram desempenhos intermediários entre os quatro métodos avaliados, com índice “c” 0,40 e 0,27 respectivamente.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- AMATYA, D. M.; SKAGGS, R. W.; GREGORY, J. D. **Comparison of methods for estimating potential evapotranspiration**. St. Joseph: ASAE, 1992. 27p. (ASAE Paper, 92-2630).
- BONOMO, R.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para as regiões cafeeiras do Triângulo e Noroeste de Minas Gerais. In CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998 Poços de Caldas. **Anais...** Lavras: UFLA: SBEA, 1998. v. 1, p. 307-309.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Equação para a estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, baseada no método de Hargreaves – 1974. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 77-81, 1996.
- CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; COSTA, J. R.; CRUZ, F. A. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica-RJ utilizando lisímetro de pesagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.14 n.1 p. 97-105, 2006.
- CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.13 n.2 p. 303-307, 2005.
- FIETZ, C. R.; SILVA, F. C.; URCHEI, M. A. Estimativa da evapotranspiração de referência diária para a região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 250-255, 2005.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. **Agriculture's use of water**. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/005/y3918e/y3918e03.htm>> . Acesso em 7 abril 2008.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. **Water managements towards 2030**. Disponível em: <<http://www.fao.org/ag/magazine/0303sp1.htm>> . Acesso em 15 maio 2008.
- JÚNIOR, A. S. A.; BASTOS, E. A.; SENTELHAS, P.C.; SILVA, A. A. G. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.11, n. 1, p. 63-68, 2003.

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.** Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba-SP. 103 p.

MEDEIROS, S. L. P. Avaliação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referência para a região mesoclimática de Santa Maria Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 105-19, 1998.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas.** Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

TAKAY, B. Y.; FERNANDES, A. L. T.; ALVES, I. V.; SILVA, R. O.; OLIVEIRA, F. R. Avaliação dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para região de Uberaba-MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 10., 2008, Araguari. **Anais...** Araguari, 2008. p. 83-87.