

ISSN 0104-1347

# Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS

## Comparison of the performance of methods to estimate reference evapotranspiration for the region of Bento Gonçalves, State of Rio Grande do Sul, Brazil

Marco Antônio Fonseca Conceição<sup>1</sup>, Francisco Mandelli<sup>2</sup>

- NOTA TÉCNICA / TECHNICAL NOTE -

**Resumo** - O método de Penman-Monteith-FAO é indicado como padrão no cálculo da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>). Contudo, ele requer variáveis meteorológicas que nem sempre estão disponíveis. O presente trabalho compara o desempenho, perante os valores diários estimados pela equação de Penman-Monteith-FAO, dos seguintes métodos de estimativa que empregam a temperatura do ar e/ou a radiação solar como variáveis de entrada, para a região de Bento Gonçalves, RS: Hargreaves & Samani, Camargo, Thornthwaite, Thornthwaite modificado, Makkink e o da Radiação. Os métodos de Makkink e da Radiação, que empregam a radiação global incidente como variável, foram os que apresentaram os melhores resultados nessa comparação, com desempenhos classificados como ótimos. Dentre os métodos que utilizam a temperatura do ar na estimativa de ET<sub>o</sub>, o de Hargreaves-Samani foi o que apresentou o melhor desempenho, sendo classificado como muito bom.

**Palavras-chave:** radiação, temperatura, Camargo, Thornthwaite, Makkink, Hargreaves-Samani, Penman-Monteith

**Abstract** - The FAO Penman-Monteith method is considered as a standard to estimate the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>). However, it requires meteorological variables that not always are available for the users. The present paper compares, for the region of Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul State, Brazil, daily values of ET<sub>o</sub> obtained by methods which use air temperature or solar radiation with the Penman-Monteith ones. The evaluated methods were the Hargreaves & Samani, Camargo, Thornthwaite, Thornthwaite modified, Makkink and Radiation methods. The Makkink and Radiation methods presented the best results on estimating daily ET<sub>o</sub>, with performances classified as excellent. The Hargreaves-Samani was the temperature-based method which presented the best performance, classified as very good.

**Key words:** radiation, temperature, Camargo, Thornthwaite, Makkink, Hargreaves-Samani, Penman-Monteith

### Introdução

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) é utilizada, entre outros fins, em balanços hídricos climatológicos, na previsão do desenvolvimento e das safras das culturas, no monitoramento de secas e no estabelecimento de zoneamentos agrícolas (MOTA et al., 1989). Na impossibilidade de se obter ET<sub>o</sub> experimentalmente, a sua determinação é feita

empregando-se métodos meteorológicos, sendo que o de Penman-Monteith é considerado, atualmente, o método padrão para cálculo da ET<sub>o</sub> (SEDIYAMA, 1996; ALLEN et al., 1998; PEREIRA et al., 2002; ITENFISU et al., 2003).

O método de Penman-Monteith requer variáveis como temperatura do ar, saldo de radiação, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Nem

<sup>1</sup> Embrapa Uva e Vinho, Estação Experimental de Viticultura Tropical, Caixa Postal 241, CEP 15700-000 Jales, SP. E-mail: marcoafc@cnpuv.embrapa.br

<sup>2</sup> Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves, RS. E-mail: mandelli@cnpuv.embrapa.br

todas elas, entretanto, estão sempre disponíveis. Por essa razão, os métodos para estimar ETo que empregam um número menor de variáveis, além de serem mais simples, ainda são importantes para objetivos práticos.

Dos métodos de estimativa que empregam a temperatura do ar como variáveis, o de Thornthwaite apresentou bom desempenho para as condições subtropicais úmidas do interior paulista, quando comparado a dados obtidos em evapotranspirômetros (CAMARGO & SENTELHAS, 1997). CAMARGO et al. (1999) apresentaram uma modificação desse método para regiões áridas e superúmidas, substituindo a temperatura média diária pela variável “temperatura efetiva”, que considera a amplitude térmica diária, o que melhorou o desempenho do método em diversas regiões (CAMARGO et al., 1999; CONCEIÇÃO, 2003).

O método de Camargo foi desenvolvido com base no método de Thornthwaite (PEREIRA et al., 1997), tendo apresentado resultados satisfatórios, em comparação aos valores medidos em evapotranspirômetros no interior de São Paulo (CAMARGO & SENTELHAS, 1997) e em Santa Maria, Rio Grande do Sul (MEDEIROS, 1998).

O método de Hargreaves & Samani, que também emprega a temperatura do ar como variável de entrada, foi desenvolvido na Califórnia em condições semi-áridas, a partir de dados obtidos em lisímetros com gramado (PEREIRA et al., 1997). A equação utiliza um coeficiente empírico fixo para regiões costeiras e outro para regiões continentais. Esse método apresentou desempenhos classificados como muito bom, nas condições do noroeste paulista (CONCEIÇÃO, 2003) e como bom, na região de Santa Maria, RS (MEDEIROS, 1998).

Os métodos que empregam a radiação solar são recomendados para regiões onde estão disponíveis observações de insolação (ou irradiância solar) e temperatura do ar, não estando, porém, aquelas de umidade do ar e ventos (DOORENBOS & PRUITT, 1997). Dentre eles, destacam-se o método de Makkink e o da Radiação-FAO, sendo o segundo desenvolvido a partir de uma adaptação do primeiro (PEREIRA et al., 1997). O método de Makkink foi avaliado por MEDEIROS (1998) nas condições de

Santa Maria, RS, apresentando um desempenho classificado como bom.

O presente trabalho teve como objetivo comparar valores diários da evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO (EToPM) com os valores estimados empregando-se métodos baseados na temperatura do ar e na radiação solar incidente, sob as condições de Bento Gonçalves, RS.

## Material e Métodos

Foram utilizados dados meteorológicos diário obtidos de 1985 a 2003 na Embrapa Uva e Vinho, município de Bento Gonçalves, RS, Brasil (latitude 29°09'S, longitude 51°31'W e altitude de 640 m). O clima da região é temperado quente (Cfb), de acordo com a classificação de Köppen (VIANELLO & ALVES, 2000), com valores médios anuais de temperatura do ar de 17,2°C e de precipitação pluvial de 1736 mm. A evapotranspiração de referência diária (EToPM) considerada padrão foi calculada utilizando-se o método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO (ALLEN et al., 1998):

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

em que “ $\Delta$ ” é a declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura (kPa °C<sup>-1</sup>); “ $R_n$ ” é a radiação líquida total diária (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>); “ $G$ ” é o fluxo total diário de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), considerado igual a zero; “ $\gamma$ ” é o coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>); “ $U_2$ ” é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>); “ $e_s$ ” é a pressão de saturação de vapor (kPa); “ $e_a$ ” é a pressão atual de vapor (kPa); e “ $T$ ” é a temperatura média do ar (°C). Os valores de “ $\Delta$ ” e “ $\gamma$ ” foram calculados pela metodologia apresentada por ALLEN et al. (1998). A radiação líquida ( $R_n$ ) foi estimada pela expressão:  $R_n = R_{ns} + R_{nl}$ , onde “ $R_{ns}$ ” é o saldo de radiação de ondas curtas (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) e “ $R_{nl}$ ” é o saldo de radiação de ondas longas (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>). Os valores de “ $R_{ns}$ ” e “ $R_{nl}$ ” foram calculados de acordo com ALLEN et al. (1998).

Os métodos utilizados para estimar a ETo com

base na temperatura do ar foram os de Hargreaves & Samani, conforme descrito por SAMANI (2000); Camargo, na forma descrita por PEREIRA et al. (1997); Thornthwaite, descrito por STONE & SILVEIRA (1995); e Thornthwaite modificado de acordo com CAMARGO et al. (1999), sendo usadas as seguintes respectivas equações:

*Método de Hargreaves-Samani:*

$$EToHS = 0,0135 Kt Ra (T_{max} - T_{min})^{0,5} (T + 17,8) \quad (2)$$

em que “EToHS” é a evapotranspiração de referência de acordo com o método de Hargreaves & Samani (mm dia<sup>-1</sup>); “Ra” é a radiação solar extraterrestre expressa em equivalente de evaporação (mm dia<sup>-1</sup>) no mês considerado; e “Kt” é um coeficiente empírico. Foi empregado um valor de “Kt” para regiões continentais igual a 0,162. Os valores diários de “Ra” foram calculados empregando-se a metodologia apresentada por ALLEN et al. (1998).

*Método de Camargo:*

$$EToC = F Ra T \quad (3)$$

em que “EToC” é a evapotranspiração de referência segundo Camargo (mm dia<sup>-1</sup>); e “F” é o fator de ajuste que varia com “T” anual (foi empregado um valor de “F” igual a 0,01, correspondente a um valor de “T” de até 23°C).

*Método de Thornthwaite:*

$$EToT = 16 (D/Nd) (10 T/I)^a \quad (4)$$

em que “EToT” é a evapotranspiração de referência mensal (mm dia<sup>-1</sup>); “D” é o fator de ajuste conforme o mês do ano e a latitude; “Nd” é o número de dias do mês; “T” é a temperatura média do ar (°C); “I” é o índice de calor anual, correspondente à soma dos 12 índices mensais “i”, sendo  $i = (T/5)^{1,514}$ ; “a” é uma função cúbica de “I”:  $a = 0,675 \cdot 10^{-6} I^3 - 0,771 \cdot 10^{-4} I^2 + 1,792 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$ . Os valores diários de “Δ” foram obtidos por

interpolação linear da tabela mensal apresentada por STONE & SILVEIRA (1995).

No método de Thornthwaite modificado por CAMARGO et al. (1999), empregou-se a temperatura efetiva “Tef” no lugar de “T”, onde  $Tef = 0,36 (3 T_{max} - T_{min})$ , denominando-se a evapotranspiração “EToTm”.

Os métodos que empregaram a radiação solar foram os de Makkink e o da Radiação, empregados como são descritos por PEREIRA et al. (1997) da seguinte forma:

*Método de Makkink:*

$$EToM = 0,61 W Rs - 0,12 \quad (5)$$

em que “EToM” é a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Makkink (mm dia<sup>-1</sup>); “Rs” é a radiação global incidente em (mm dia<sup>-1</sup>); “W” é um fator de ponderação calculado pela equação  $W = \Delta / (\Delta + \gamma)$ .

*Método da radiação:*

$$EToR = Cr W Rs \quad (6)$$

em que “W” e “Rs” correspondem às mesmas variáveis já descritas nos métodos de Makkink e de Penman-Monteith, respectivamente, e “Cr” é um coeficiente que depende da velocidade do vento ( $U_2$ ) e da umidade relativa média do ar (UR). Como o objetivo do trabalho foi o de avaliar o uso de métodos na ausência de informações sobre “ $U_2$ ” e “UR”, decidiu-se utilizar um valor empírico de “Cr” igual a 0,680, ajustado para as condições regionais por meio de regressão linear entre os valores de “W Rs” e EToPM, utilizando-se a série de 1985 a 1994, enquanto que a comparação entre os valores de EToR e EToPM foi efetuada empregando-se dados do período de 1995 a 2003.

Os valores de EToHS, EToC, EToT, EToTm, EToM e EToR foram comparados com os valores de EToPM utilizando-se o coeficiente de desempenho “c” proposto por CAMARGO & SENTELHAS (1997), correspondente à multiplicação do coeficiente de correlação “r” pelo coeficiente de exatidão “d” proposto por Willmott

et al. (1985) e descrito por CAMARGO & SENTELHAS (1997) da seguinte forma:

$$d = 1 - \left\{ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right\} \quad (7)$$

em que “ $P_i$ ” são valores estimados; “ $O_i$ ” são valores de EToPM e “ $O$ ” é a média dos valores de EToPM. O desempenho foi classificado como ótimo para valores de “ $c$ ” maiores que 0,85; como muito bom para valores entre 0,76 e 0,85; como bom para valores entre 0,66 e 0,75; como regular para valores entre 0,51 e 0,65; como ruim para valores entre 0,41 e 0,50; e como péssimo para valores inferiores a 0,40.

## Resultados e Discussão

A Tabela 1 mostra os resultados dos índices classificatórios de desempenho.

Os métodos que utilizam radiação solar incidente como variável foram os que apresentaram os maiores valores de “ $r$ ”, “ $d$ ” e “ $c$ ” neste trabalho (Tabela 1), tendo desempenhos classificados como ótimos, ainda que no método de Makkink tenham sido empregados coeficientes que foram ajustados para as condições de Wageningen, na Holanda (PEREIRA et al., 1997). MEDEIROS (1998) obteve com o método de Makkink um valor de “ $c$ ” igual a 0,72 para a região de Santa Maria, com desempenho classificado como bom. Deve-se ressaltar, entretanto, as diferenças de altitude entre os locais e o fato de que em Santa Maria foram utilizados médias quinquidiais e valores de ETo medidos com evapotranspirômetros de drenagem.

O método original de Thornthwaite e o de Camargo apresentaram apenas desempenho regular ( $c=0,58$  e  $c=0,61$ ). A similaridade de desempenho entre os métodos de Thornthwaite e de Camargo é esperada, pois o segundo foi desenvolvido com base no primeiro. MEDEIROS (1998) observou em Santa Maria um desempenho para o método de Camargo melhor do que o obtido neste estudo ( $c=0,79$ ).

Os métodos de Hargreaves-Samani e de Thornthwaite modificado tiveram desempenho muito bom ( $c=0,84$  e  $c=0,78$ , respectivamente),

quando comparados com o método tomado com padrão. O desempenho muito bom do método de Hargreaves-Samani pode ser considerado inesperado, pelo fato dele ter sido ajustado para as condições semi-áridas da Califórnia (PEREIRA et al., 1997). MEDEIROS (1998), entretanto, já havia registrado seu bom desempenho para Santa Maria, RS, com “ $c$ ”=0,73 e “ $d$ ”=0,83 (piores do que neste estudo) e “ $r$ ” =0,88 (muito similar ao deste trabalho).

O desempenho surpreendente do método de Hargreaves & Samani nessas regiões do Rio Grande do Sul pode ser decorrente do fato de que as diferenças entre a temperatura máxima e a mínima nele usadas refletem, de certa forma, as condições de umidade do ar da região (SAMANI, 2000) pois, em geral, quanto maior a umidade relativa, menor a amplitude térmica. Deve-se registrar, também, que embora no método tenha-se estimado  $R_s$  em função de  $R_a$  e temperaturas extremas (equação 2), no presente estudo foi encontrada boa correlação ( $r=0,82$ ) entre os valores estimados e os medidos de  $R_s$ , não se constituindo, assim, a estimativa de  $R_s$  uma grande fonte de erro.

A melhora do desempenho do método de Thornthwaite com uso da temperatura efetiva, em relação ao método original de Thornthwaite, foi observada, também, em outras regiões (CAMARGO et al., 1999; CONCEIÇÃO, 2003), como consequência de Tef refletir melhor as condições meteorológicas do período diurno, no qual ocorre a maior parte do processo evaporativo.

## Conclusões

Os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) que empregaram a radiação solar incidente apresentaram desempenhos superiores aos que utilizaram somente valores de temperatura do ar.

Dentre os métodos que utilizaram somente a temperatura do ar, o de Hargreaves-Samani foi o que apresentou o melhor desempenho.

## Referências Bibliográficas

ALLEN R.G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH,

**Tabela 1** – Coeficientes de correlação (r), exatidão (d) e desempenho (c) para valores diários de evapotranspiração de referência calculada por diferentes métodos de estimativa comparados com o método padrão de Penman-Monteith parametrizado pela FAO. Período de 1985 a 2003, Bento Gonçalves, RS.

Métodos de estimativa de ETo	r	d	c	Desempenho
Hargreaves-Samani	0,89	0,94	0,84	Muito bom
Camargo	0,75	0,81	0,61	Regular
Thornthwaite	0,74	0,79	0,58	Regular
Thornthwaite modificado	0,86	0,91	0,78	Muito bom
Makkink	0,96	0,95	0,91	Ótimo
Radiação	0,96	0,98	0,93	Ótimo

**M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.** Rome: FAO, 1998. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56).

CAMARGO, A P. de ; 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. et al. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.2, p.251-257, 1999.

CONCEIÇÃO, M.A.F. Estimativa da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar para as condições do Baixo Rio Grande, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.11, n.2, p.229-236, 2003.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Necessidades hídricas das culturas.** Campina Grande: UFPB, 1997. 204p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 24).

ITENFISU, D.; ELLIOTT, R.L.; ALLEN, R.G.; WALTER, I.A. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE Standardization effort. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.129, n.6, p.440-448, 2003.

MEDEIROS, S.L.P. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para

a região mesoclimática de Santa Maria, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.1, p.105-109, 1998.

MOTA, F.S. da ; VERONA, L.A.F.; MOTA, J.F.A.S.; NOVAES, L.E.S.M. **O microcomputador na meteorologia agrícola.** São Paulo: Nobel, 1989. 137p.

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

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

SAMANI, Z. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v.126, n.4, p.265-267, 2000.

SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.1, p.i-xii, 1996.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. da. **Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação.** Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1995. 49p. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 55).

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações.** Viçosa: UFV, 2000. 449p.