



## CORRELAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POR RADIAÇÃO COM O MÉTODO FAO-PENMAN-MONTEITH

FRANCISCO F. N. MARCUZZO<sup>1</sup>; RODRIGO L. MANZIONE<sup>2</sup>; EDSON WENDLAND<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Pós-Doutorando, Depto. de Hidráulica e Saneamento - EESC-USP/São Carlos-SP, Cx. P.: 359, CEP: 13560-970. [fmarcuzzo@gmail.com](mailto:fmarcuzzo@gmail.com)

<sup>2</sup> Prof. Assistente Dr., UNESP/Ourinhos-SP - Av. Vitalina Marcusso, nº 1500, CEP 19910-206. [manziona@ourinhos.unesp.br](mailto:manziona@ourinhos.unesp.br)

<sup>3</sup> Prof. Associado Dr., Depto. de Hidráulica e Saneamento - EESC-USP/São Carlos-SP, Cx. P.: 359, CEP: 13560-970. [ew@sc.usp.br](mailto:ew@sc.usp.br)

Escrito para apresentação no  
XXXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola  
2 a 6 de agosto de 2009 - Juazeiro-BA/Petrolina-PE

**RESUMO:** Uma das formas de se verificar o desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial para uma determinada região é compará-los com o método combinado, baseado na radiação e no balanço de massa. O objetivo deste trabalho foi o de analisar a correlação de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial por radiação com o método combinado padrão FAO-Penman-Monteith (1998) para a região central do Estado de São Paulo. Os dados climatológicos foram coletados na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, da Universidade de São Paulo, localizada no município de Itirapina/SP. Foi calculada a evapotranspiração potencial diária para cada método estudado e, em seguida, calculada a correlação diária de cada método com o método padrão da FAO, considerando os dias corridos de janeiro a dezembro do ano de 2008 e entre os meses. Os resultados obtidos demonstraram a seguinte ordem decrescente de correlação com o método padrão FAO-Penman-Monteith (1998): Priestley-Taylor (1972), Hargreaves-Samani (1982), Turk (1961), Makkink (1957), Jensen-Haise (1963) e Camargo (1971).

**PALAVRAS-CHAVE:** climatologia, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise.

### CORRELATION OF EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION METHODS BASED ON RADIATION WITH FAO-PENMAN-MONTEITH METHOD

**ABSTRACT:** One of the ways to verify the performance of different methods to estimate potential evapotranspiration is comparing it with the combined method based on radiation and mass balance. The aim of this work was to analyze the correlation of different theoretical methods with the FAO-Penman-Monteith standard method (1998) for the central region of the State of São Paulo. The climatologic data were collected in the Climatologic Station of the Center for Water Resources and Applied Ecology, of the University of São Paulo, located at Itirapina/SP. The daily potential evapotranspiration was calculated for each method and then calculated the correlation of the results with the FAO standard method. We considered the running days from January to December 2008. The results indicated the following decreasing correlation with the FAO-Penman-Monteith standard method (1998): Priestley-Taylor (1972), Hargreaves-Samani (1982), Turk (1961), Makkink (1957), Jensen-Haise (1963) and Camargo (1971).

**KEYWORDS:** climatology, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise.

**INTRODUÇÃO:** Segundo Bernardo (1995), a determinação da quantidade de água necessária para as culturas é um dos principais parâmetros para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de qualquer sistema de irrigação. Sua quantificação é realizada executando-se o balanço hídrico da camada do solo ocupada pelo sistema radicular da cultura, o qual tem, na “evapotranspiração” e na precipitação pluviométrica, seus principais componentes. O processo físico de mudança de estado da água de líquido para vapor pode ser influenciado por qualquer fator climático e controlado pela



disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica por vapor de água e pelo suprimento de água do solo às plantas (ALLEN *et al.*, 1998; PEREIRA *et al.*, 2002). Com isso, verifica-se que processos de estimativa de evapotranspiração que aglomeram a maior quantidade de fatores que interferem no processo tendem a serem mais eficazes. Consultores da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), revisando os métodos de estimativa de evapotranspiração, determinaram que o método FAO-Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998) pode ser utilizado como método padrão para estimativa da evapotranspiração potencial, por ser baseado em processos físicos, como o balanço de massa e a radiação, além de acrescentar parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos das plantas. Entretanto, o método FAO-Penman-Monteith requer uma grande quantidade de dados climatológicos, limitando sua aplicação em locais que não dispõem de uma estação meteorológica completa, capaz de fornecer todos os dados necessários. Nesses casos ou na ausência temporária de alguns dados, pode-se utilizar outros métodos para a estimativa da evapotranspiração potencial, desde que estes possuam boa correlação com o método padrão recomendado pela FAO. Dentro do contexto apresentado, o objetivo deste trabalho foi o de analisar a correlação de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial baseadas na radiação com o método combinado padrão da FAO-Penman-Monteith.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Os dados climatológicos utilizados foram coletados no ano de 2008 no município de Itirapina/SP, na estação meteorológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, pertencente à Universidade de São Paulo, localizada na latitude 22°10'13,2''S e longitude 47°53'56,1'' W e a uma altura de 733 metros acima do nível do mar. A vegetação predominante na região era o cerrado, com manchas de mata galeria nos solos mais úmidos. Atualmente, predominam o reflorestamento com *Pinus sp* e áreas de agricultura intensiva, principalmente com cana-de-açúcar e laranja. O clima da região é controlado pelas massas de ar equatorial e tropical com períodos seco (maio a outubro) e úmido (novembro a abril).

Neste estudo serão analisados os métodos de Makkink (1957), Turk (1961), Jensen-Haise (1963), Camargo (1971), Priestley-Taylor (1972), Hargreaves-Samani (1982) e FAO-Penman-Monteith, cujo equacionamento matemático é apresentado a seguir.

Makkink (MAIDMENT, 1993) trabalhando com parâmetros climatológicos da Holanda, desenvolveu a seguinte equação:

$$ETp_{MAK} = \left( CM_1 \cdot \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \cdot R_s \right) \cdot CM_2 \quad (1)$$

em que,  $ETp_{MAK}$  – evapotranspiração potencial por Makkink ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $CM_1$  e  $CM_2$  – coeficientes da equação, geralmente 0,61 e -0,012;  $\Delta$  – derivada da relação (inclinação da curva) entre a pressão de saturação de vapor da água e a temperatura ( $\text{mb} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  ou  $\text{hPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $\gamma$  – constante psicrométrica ( $\text{mb} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  ou  $\text{hPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $R_s$  – energia total incidente sobre a superfície terrestre ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

O método de Turc utiliza, além da radiação, a temperatura e a umidade relativa do ar (MAIDMENT, 1993):

$$Se(UR) \geq 50, \quad ETp_{TUR} = 0,013 \cdot \left( \frac{T}{T + 15} \right) \cdot (R_s + 50) \quad (2)$$

$$Se(UR) < 50, \quad ETp_{TUR} = 0,013 \cdot \left( \frac{T}{T + 15} \right) \cdot (R_s + 50) \cdot \left( 1 + \frac{50 - UR}{70} \right) \quad (3)$$

em que,  $ETp_{TUR}$  – evapotranspiração potencial por Turc ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $T$  – temperatura média do ar ( $^\circ\text{C}$ );  $UR$  – umidade relativa do ar (%).

A equação de Jensen & Haise (TUCCI *et al.*, 2004), é uma das mais utilizadas entre os métodos baseados na radiação, fornecendo resultados razoáveis em diferentes condições climáticas:



$$ETp_{J-H} = (0,025.RS + 0,08) \cdot \frac{T}{59} \quad (4)$$

em que,  $ETp_{J-H}$  – evapotranspiração potencial por Jensen & Haise (mm.dia<sup>-1</sup>);  $RS$  – radiação solar (Wat.m<sup>2</sup>).

A equação proposta por Camargo (1971) é expressa por:

$$ETp_{CAM} = 0,01.Ra.T.Fa_C \quad (5)$$

em que,  $ETp_{CAM}$  – evapotranspiração potencial por Camargo (mm.dia<sup>-1</sup>);  $Ra$  – radiação solar extraterrestre no topo da atmosfera (mm.dia<sup>-1</sup>);  $Fa_C$  – Fator de ajuste, segundo a temperatura ( $T$ ), sendo 1,00 para  $T$  até 23,5 °C; 1,05 para  $T$  de 23,6 a 24,5 °C; 1,10 para  $T$  de 24,6 a 25,5 °C; 1,15 para  $T$  de 25,6 a 26,5 °C; 1,20 para  $T$  de 26,6 a 27,5 °C e 1,30 para  $T$  superior a 27,5 °C.

Evapotranspiração potencial por Priestley-Taylor (1972), consiste em:

$$ETp_{P-T} = \frac{\left[ \varphi \cdot \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \cdot (R_n - G) \right]}{\lambda} \quad (6)$$

em que,  $ETp_{P-T}$  – evapotranspiração potencial por Priestley-Taylor (mm.dia<sup>-1</sup>);  $\varphi$  – coeficiente de Priestley-Taylor (1,26);  $\Delta$  – derivada da relação (inclinação da curva) entre a pressão de saturação de vapor da água e a temperatura (kPa.°C<sup>-1</sup>);  $\gamma$  – constante psicrométrica (kPa.°C<sup>-1</sup>);  $R_n$  – radiação útil recebida (MJ.(m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup>);  $G$  – fluxo de calor recebido pelo solo (MJ.(m<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup>);  $\lambda$  – calor latente de evaporação (MJ.kg<sup>-1</sup>).

Hargreaves e Samani (1982) publicaram diversas equações para cálculo da evapotranspiração potencial, porém neste trabalho utilizou-se apenas a equação baseada na radiação solar:

$$ETp_{H-S-RS} = 0,013.(T + 17,8).RS \quad (7)$$

em que,  $ETp_{H-S-RS}$  – evapotranspiração potencial por Hargreaves-Samani (mm.dia<sup>-1</sup>).

A evapotranspiração pelo método FAO-Penman-Monteith (1998) foi determinada, conforme metodologia apresentada por Allen *et al.* (1998):

$$ET_{F-P-M} = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (8)$$

em que,  $ET_{F-P-M}$  – evapotranspiração de referência por FAO-Penman-Monteith (mm.dia<sup>-1</sup>);  $u_2$  – velocidade média do vento coletada a 2 m de altura, (m.s<sup>-1</sup>);  $e_s$  – pressão de saturação do vapor d'água, kPa;  $e_a$  – pressão atual do vapor d'água (kPa).

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** A Tabela 1 apresenta a média anual de correlação diária entre os métodos analisados. A Figura 1 apresenta a média mensal de correlação diária em cada mês. Observa-se que os métodos de estimativa de evapotranspiração por Priestley-Taylor (1972), Hargreaves-Samani (1982) e Turk (1961), Makkink (1957) obtiveram as maiores médias de correlação com o método padrão FAO-Penman-Monteith (1998).

TABELA 1. Correlação entre médias anuais dos dados diários para o ano de 2008, de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial com o método padrão FAO-Penman-Monteith (1998).

| ANO  | Correlação de evapotranspiração - Métodos Baseados na Radiação Solar |                    |                    |                    |                    |                       |
|------|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
|      | ETp <sub>MAK</sub>   | ETp <sub>TUR</sub> | ETp <sub>J-H</sub> | ETp <sub>CAM</sub> | ETp <sub>P-T</sub> | ETp <sub>H-S-RS</sub> |
| 2008 | 0,82   | 0,84               | 0,65               | 0,64               | 0,85               | 0,85                  |

Já os métodos de Jensen-Haise (1963) e Camargo (1971) ficaram relativamente abaixo da média dos outros métodos estudados, sendo o método de Camargo (1971) o que obteve pior desempenho para os dados climatológicos coletados no ano de 2008.

Nota-se que nos meses com menos pluviosidade no estado de São Paulo (de abril a setembro) há uma menor correlação média geral das equações estudadas com a do método padrão FAO-Penman-Monteith devido às mesmas terem em seus parâmetros grande influência de climas úmidos.

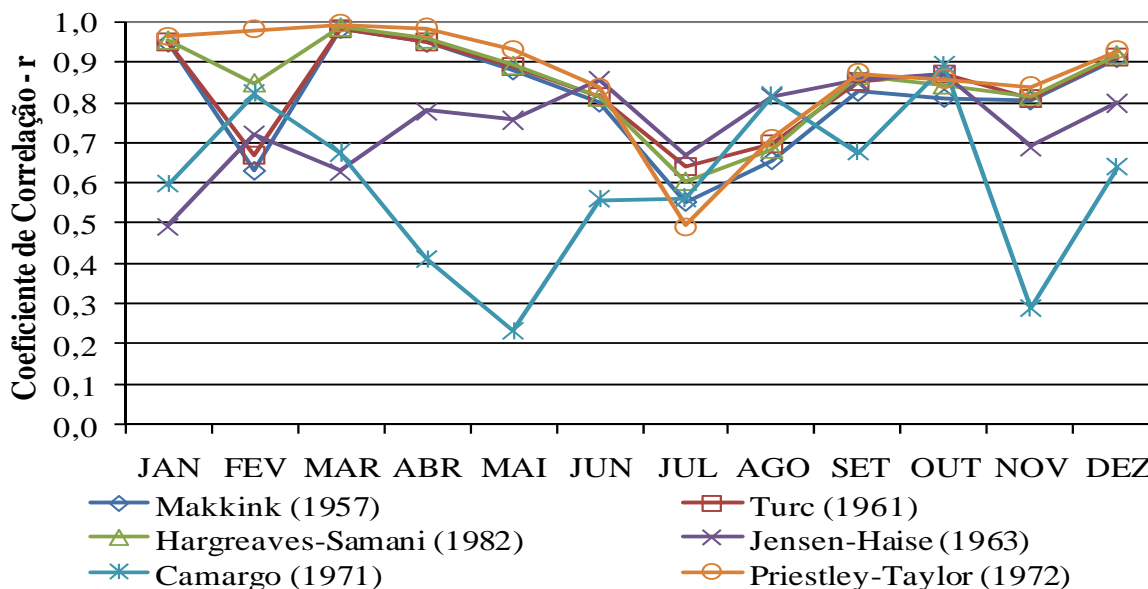


FIGURA 1. Correlação entre os dados diários em cada mês, para o ano de 2008, de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial com o método padrão FAO-Penman-Monteith (1998).

**CONCLUSÕES:** Concluiu-se que, tanto para os dados diários por mês, quanto para os dados diários do ano todo, houve a seguinte ordem decrescente de correlação com o método padrão FAO-Penman-Monteith: Priestley-Taylor (1972), Hargreaves-Samani (1982), Turc (1961), Makkink (1957), Jensen-Haise (1963) e Camargo (1971).

**AGRADECIMENTOS:** Os autores agradecem ao CNPq - Brasil (processo 152033/2008-4) e à FAPESP pelo auxílio financeiro que viabilizou o desenvolvimento deste trabalho.

## 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).
- BERNARDO, S. *Manual de Irrigação*. 6 ed. Viçosa: UFV, 1995. 657 p.
- CAMARGO, A. Paes. *Balanço hídrico no Estado de São Paulo*. 3.ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1971. 24 p. (Boletim, 116)
- HARGREAVES, G.H.; Z.A. SAMANI. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineer*, ASCE, 108(IR3):223-230.
- MAIDMENT, D.R. (Org.). *et al. Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York, 1993.
- PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.
- PEREIRA, A.R.; NOVA, N.A.V.; SEDIYAMA, G.C. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.
- PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, Madison, v.100, n.2, p.81-92, 1972.
- TUCCI, C. E. M. (Org.). *et al. Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 3ª ed., Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ABRH, 2004. 944 p.