

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O MUNICÍPIO DE PETROLINA, PE

**ROBERTA DANIELA DA SILVA SANTOS¹; MARCELLO HENRYQUE COSTA DE
SOUZA¹; REGIANE DE CARVALHO BISPO¹; KEVIM MUNIZ VENTURA¹ E LUÍS
HENRIQUE BASSOI²**

¹Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP/FCA, Rua Dr. José Barbosa de Barros, 1780, Botucatu, SP, roberta_dani30@hotmail.com, marcello_henry@hotmail.com, regianecarvalhoks@gmail.com, kkkevim@hotmail.com

²Pesquisador Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP, luis.bassoi@embrapa.br

1 RESUMO

O conhecimento da evapotranspiração é vital na determinação das necessidades hídricas de uma cultura. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi comparar o desempenho de sete métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em relação ao método de Penman-Monteith, adotado como padrão, para o município de Petrolina, PE. Foram utilizados dados climáticos diários de 2004 a 2015, para estimar da ET_0 , obtidos na estação meteorológica automática do Campo Experimental de Bebedouro da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE. Os indicadores estatísticos utilizados na avaliação foram: coeficiente de determinação (r^2); coeficiente de correlação (r); índice de concordância (d) e índice de desempenho (c). Os valores do r^2 mostraram que o método de estimativa que melhor se ajustou ao método de Penman-Monteith foi o de Ivanov (0,73); seguido pelos métodos de Jensen-Haise (0,64); Makkink e Priestley-Taylor (0,63); Villa Nova (0,62); Hargreaves e Samani (0,53) e Hamon (0,45). No entanto, com relação ao do índice “c”, Hamon foi classificado com “péssimo”; Makkink como “mau”; Hargreaves e Samani e Villa Nova como “sofrível”; Ivanov e Priestley-Taylor como “mediano”; e Jensen-Haise como “bom”. Esse último método foi considerado como o de melhor classificação de desempenho.

Palavras-chave: Penman-Monteith, correlação, semiárido.

**SANTOS, R. D. S.; SOUZA, M. H. C.; BISPO, R. de C.; VENTURA, K. M.; BASSOI, L.
H.**

**METHOD-COMPARISON STUDY TO ESTIMATE THE REFERENCE
EVAPOTRANSPIRATION IN PETROLINA, PE**

2 ABSTRACT

The knowledge on evapotranspiration is vital in determining the water requirements of a crop. Therefore, this paper aims to compare the performance of seven of estimation methods for the reference evapotranspiration in relation to the Penman-Monteith method, adopted as standard, for the municipality of Petrolina, state of Pernambuco, Brazil. We used daily climatic data from 2004 to 2015 to estimate the ET_0 coefficient, obtained in the automatic weather station of the

Test Field in Bebedouro, Embrapa in the Semi-arid climate. The statistical indicators used in the evaluation were: coefficient of determination (r^2), correlation coefficient (r), agreement index (d) and performance index (c). The r^2 values showed that the estimation method that best fitted to the Penman-Monteith method was Ivanov's (0.73), followed by Jensen-Haise (0.64), Makkink and Priestley-Taylor (0.63), Villa Nova (0.62), Hargreaves and Samani (0.53) and Hamon (0.45) methods. However, in relation to the index "c", Hamon was classified as "very poor"; Makkink as "poor"; Hargreaves and Samani and Villa Nova as "tolerable"; Ivanov and Priestley-Taylor as "medium"; and Jensen-Haise as "good". The last one was considered as the best performance rating method.

Keywords: Penman-Monteith, correlation, semi-arid climate.

3 INTRODUÇÃO

Petrolina está localizada no sertão de Pernambuco, na região do Submédio São Francisco e é considerada uma das principais potências agrícolas do Vale do São Francisco. Essa importância econômica foi conseguida por uma diversidade de fatores, dos quais destaca-se a irrigação.

O município apresenta uma importante atividade agrícola, a qual é extremamente dependente da irrigação, devido ao baixo índice pluviométrico, que não atende as necessidades hídricas das culturas agrícolas. Assim, o manejo da irrigação é essencial para aumentar a eficiência dos sistemas de irrigação e proporcionar o uso racional dos recursos hídricos, visando aplicar somente a quantidade de água necessária ao desenvolvimento adequado da planta.

O manejo da irrigação pode ser feito com base em informações do solo, da planta, do clima, ou mesmo utilizando mais de um critério (uso combinado de informações). No manejo com base em informações do clima, faz-se necessário conhecer a evapotranspiração de referência (ET_0), que segundo Allen et al. (1998), é definida como a evapotranspiração de um gramado, sem restrição hídrica, em crescimento ativo, cobrindo toda a superfície do solo, com altura média de 0,12 m e albedo de 0,23. A partir da ET_0 e do coeficiente da cultura (K_c), calcula-se a evapotranspiração da cultura (ET_c) (SEDIYAMA, 1996).

O cálculo da demanda hídrica das culturas feito com base na evapotranspiração pode ser obtido por meio de equações matemáticas que utilizam dados meteorológicos como parâmetros de entrada. Na literatura existem diversos métodos para cálculo da evapotranspiração, citando-se em ordem cronológica Thornthwaite (1948), Makkink (1957), Hamon (1961), Jensen e Haise (1963), Priestley e Taylor (1972), Ivanov (1973), Hargreaves e Samani (1982), Penman-Monteith (1998), dentre outros.

Dentre os métodos citados, o de Penman-Monteith (1998) é considerado padrão segundo a FAO. Entretanto, esse método requer muitas variáveis meteorológicas, o que dificulta sua utilização pelos produtores. Na ausência de todos esses dados meteorológicos, pode-se utilizar métodos mais simples para o cálculo da evapotranspiração.

Segundo Jensen, Burman e Allen (1990) e Allen et al. (1998), as condições climáticas de um determinado local, podem afetar a precisão desses métodos de estimativa da evapotranspiração. Dessa forma, faz-se necessário determinar quais métodos apresentam correlação favorável, em comparação ao método padrão de Penman-Monteith, para que possa subsidiar o manejo da irrigação.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi comparar o desempenho de sete métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em relação ao método padrão de Penman-Monteith, para o município de Petrolina, PE.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A estimativa da ET_0 foi realizada com dados climáticos diários de 2004 a 2015, obtidos na estação meteorológica automática do Campo Experimental de Bebedouro, da Embrapa Semiárido, em Petrolina, PE, localizada nas coordenadas geográficas 09°09' S e 40°22' W e altitude de 365,5 m. O clima da região é classificado segundo Koeppen como tipo BSw'h', semiárido; com precipitação média anual de 567 mm e temperatura média anual de 26,2 °C. As estimativas de ET_0 tomaram como base dados coletados por meio de um datalogger, programado para efetuar leituras a cada 60 segundos e médias a cada 30 minutos, bem como, médias diárias.

Foram utilizadas as seguintes equações para determinação da ET_0 : equação de referência Penman-Monteith (1), Makkink (2), Hamon (3), Jensen-Haise (4), Priestley-Taylor (5), Ivanov (6), Hargreaves e Samani (7) e Villa Nova (8).

- Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \frac{\gamma 900 U_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad (01)$$

Em que:

- ET_0 – evapotranspiração de referência, mm d⁻¹;
- Δ – gradiente da curva pressão vapor vs temperatura, kPa °C⁻¹;
- R_n – radiação solar líquida disponível, MJ m⁻² d⁻¹;
- G – fluxo de calor no solo, MJ m⁻² d⁻¹;
- γ – constante psicrométrica, kPa °C⁻¹;
- U_2 – velocidade do vento a 2 m, m s⁻¹;
- e_s – pressão de saturação do vapor de água atmosférico, kPa;
- e_a – pressão atual do vapor de água atmosférico, kPa;
- T – temperatura média diária do ar, °C.

- Makkink (descrito por PEREIRA, VILLA NOVA e SEDIYAMA, 1997):

$$ET_0 = 0,61 W R_s - 0,12 \quad (02)$$

Em que:

- R_s – radiação solar global incidente, mm d⁻¹;
- W – fator de ponderação calculado pela equação: $W = \Delta / (\Delta + \gamma)$.

- Hamon (citado por CAVALCANTE JUNIOR et al., 2011):

$$ET_0 = 0,55 \left(\frac{N}{12} \right)^2 \left(\frac{4,95 \exp^{0,062 * T}}{100} \right) 25,4 \quad (03)$$

Em que:

T – temperatura média do ar, °C;
N – fotoperíodo, h.

- Jensen-Haise (citado por CAVALCANTE JUNIOR et al., 2011):

$$ET_0 = R_s(0,0252T_0,078) \quad (04)$$

Em que:

T – temperatura média do ar, °C;
R_s – radiação solar global à superfície, cal cm⁻² dia⁻¹.

- Priestley-Taylor (citado por BORGES JÚNIOR et al., 2012):

$$ET_0 = 1,26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + G) \quad (05)$$

Em que:

Δ – gradiente da curva pressão vapor vs temperatura, kPa °C⁻¹;
γ – constante psicrométrica, kPa °C⁻¹;
R_n – radiação solar líquida disponível, MJ m⁻² d⁻¹;
G – fluxo de calor no solo, MJ m⁻² d⁻¹.

- Ivanov (descrito por JENSEN; HAISE, 1973):

$$ET_0 = 0,006(25+T)^2 \left(1 - \frac{UR}{100}\right) \quad (06)$$

Em que:

T – temperatura média do ar, °C;
UR – umidade relativa, %.

- Hargreaves e Samani (citado por PEREIRA, VILLA NOVA e SEDIYAMA, 1997):

$$ET_0 = 0,0023Q_0(T_{\max} - T_{\min})^{0,5}(T_{\text{med}} + 17,8) \quad (07)$$

Em que:

Q₀ – irradiância solar extraterrestre, mm dia⁻¹;
T_{max} – temperatura máxima do ar, °C;
T_{med} – temperatura média do ar, °C;
T_{min} – temperatura mínima do ar, °C.

- Villa Nova (citado por VILLA NOVA e PEREIRA et al., 2006):

$$ET_0 = 0,408 \frac{(R_n - G)}{(2 - \omega)} \quad (08)$$

Em que:

G – fluxo de calor no solo, MJ m⁻²;

R_n – balanço de energia radiante na superfície vegetada, MJ m⁻² d⁻¹;
 ω – fator de ponderação do balanço de energia, adimensional.

As análises dos dados foram feitas por comparação entre a ET₀ padrão (Penman-Monteith) e as ET₀ estimadas pelos diferentes métodos, por meio da regressão linear analisando o coeficiente “r²”, e da utilização dos coeficientes “c” de desempenho (Tabela 1) e “d” de exatidão (equação 9), proposto por Camargo e Sentelhas (1997); e por Willmott, Ckleson e Davis (1985), respectivamente.

Tabela 1. Valores dos coeficientes de desempenho citado por Camargo e Sentelhas (1997).

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

- Coeficiente “d” de exatidão proposto por Willmott, Ckleson e Davis (1985)

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (09)$$

Em que:

- P_i – valor da ET₀ estimado;
- O_i – valor da ET₀ padrão;
- O – média dos valores observados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos indicadores estatísticos utilizados na avaliação do desempenho dos métodos de estimativa da ET₀. Verificou-se que entre os métodos analisados, apenas o método de Jensen-Haise apresentou desempenho classificado como “bom”, com “c” = 0,71. Segundo Medeiros (2008), essa equação foi desenvolvida para regiões áridas e semiáridas, demonstrando seu bom desempenho para a região estudada. Cavalcante Júnior et al. (2011); e Ribeiro, Simeão e Santos (2016) também verificaram resultados semelhantes no município de Mossoró – RN e Piripiri – PI, respectivamente.

Tabela 2. Coeficientes de determinação (r^2), correlação (r), exatidão (d) e de desempenho (c) para valores diários da ET_0 em Petrolina, PE, no período de 2004 a 2015.

Métodos de estimativa de ET_0	Coeficientes				Desempenho
	r^2	r	d	c	
Makkink	0,63	0,79	0,61	0,48	Mau
Hamon	0,45	0,67	0,59	0,40	Péssimo
Jensen-Haise	0,65	0,81	0,88	0,71	Bom
Priestley-Taylor	0,63	0,79	0,82	0,65	Mediano
Ivanov	0,71	0,84	0,75	0,63	Mediano
Hargreaves e Samani	0,53	0,729	0,822	0,60	Sofrível
Villa Nova	0,62	0,79	0,68	0,53	Sofrível

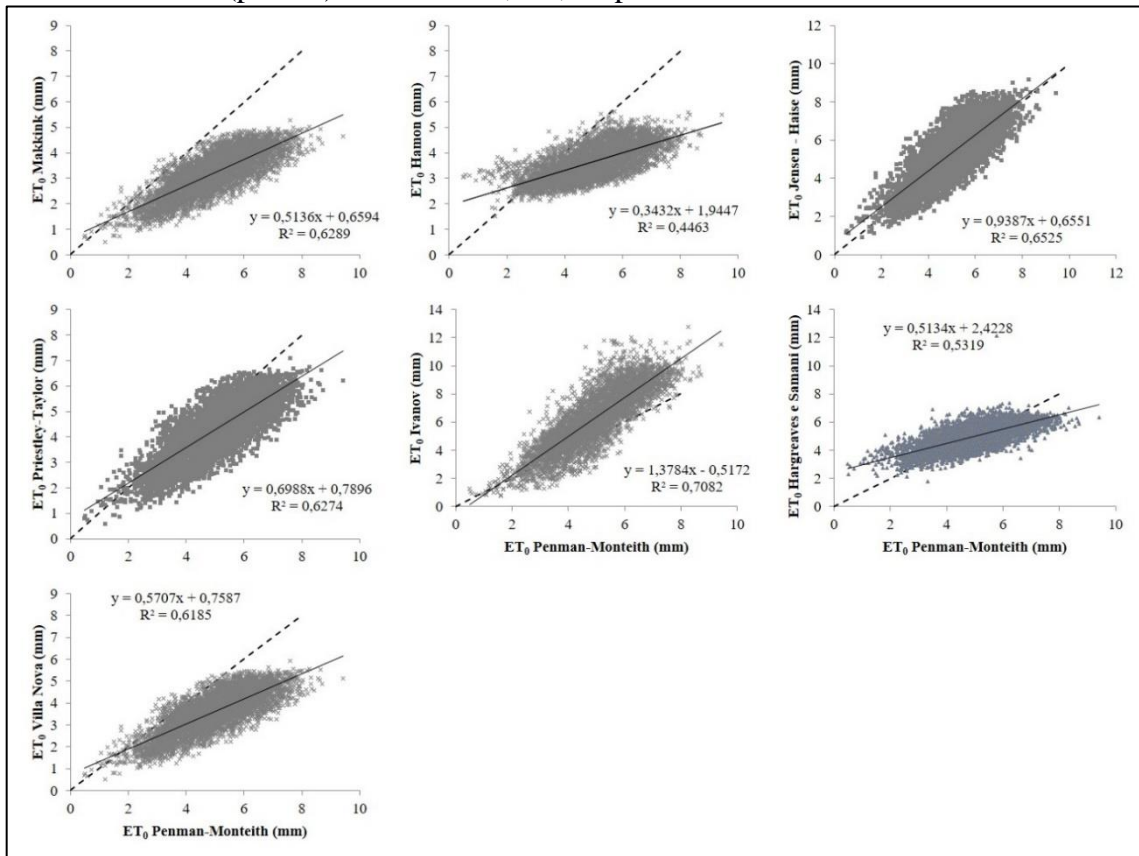
As equações de Priestley-Taylor e Ivanov apresentaram classificação como “mediano” para o coeficiente de desempenho (0,65 e 0,63, respectivamente), e 0,63 e 0,71 para o coeficiente de determinação, respectivamente. Apesar dessa classificação, a equação de Ivanov apresentou o maior valor em relação ao “ r^2 ”, resultando em um melhor ajuste em relação ao método padrão de Penman-Monteith. Da mesma forma, Silva et al. (2005) verificaram para Petrolina valores de coeficiente de determinação de 0,91 e 0,42 para as estações chuvosa e seca, respectivamente. Segundo Sentelhas et al. (2000), o método de Priestley-Taylor, é sensível as variações de umidade, tornando-o passível de apresentar valores diferentes de coeficiente de determinação de acordo com os períodos do ano (seco e chuvoso).

Os métodos de Hargreaves e Samani e Villa Nova foram classificados como “sofrível” (0,60 e 0,53, respectivamente). Para o método de Hargreaves e Samani, Silva et al. (2005) constataram resultados semelhantes para a cidade de Petrolina com valores de “ c ” acima de 0,60. Com relação a estimativa da ET_0 pelo método de Villa Nova, Bispo (2012) encontrou resultados diferentes, com classificação de “muito bom” para o método no município de Juazeiro, BA.

Os métodos de Makkink e Hamon apresentaram desempenho caracterizado como “mau” e “péssimo”, com índice “ c ” de 0,48 e 0,40, respectivamente. Resultados semelhantes para o método de Makkink foram observados por Araújo, Costa e Santos (2007) e Ieler et al. (2015), que o classificaram como “sofrível” para o município de Boa Vista, RR e Alto Vale do Itajaí, SC. Com relação a equação de Hamon, Cavalcante Junior et al. (2011) constataram desempenho “péssimo” e “mau” para período seco e chuvoso em Mossoró, RN, respectivamente.

Na Figura 1 são apresentados os resultados da correlação entre os métodos de estimativa da ET_0 . Verificou-se que os métodos de Makkink, Priestley-Taylor, Villa Nova e Hamon apresentaram tendência de subestimar os valores de ET_0 . Resultados semelhantes foram obtidos para o método de Makkink (FERRONATO et al., 2016) em Santo Antônio do Leverger – MT, e para o método de Hamon em Mossoró, RN (CAVALCANTE JÚNIOR et al., 2011).

Figura 1. Correlação entre os métodos de estimativas de ET_0 com o método de Penman-Monteith (padrão) em Petrolina, PE, no período de 2004 a 2015.



Resultados divergentes ao observado nesse estudo foram descritos por Silva et al. (2011) em Uberlândia – MG; e Ribeiro, Simeão e Santos (2016) em Piri-piri – PI, onde o método de Priestley-Taylor superestimou os valores de ET_0 estimado pelo método padrão.

Os métodos de Ivanov e Jensen-Haise (Figura 1) tiveram tendência de superestimar os valores de ET_0 determinado pelo método padrão. Ribeiro, Simeão e Santos (2016) relataram o mesmo comportamento na estimativa por Jensen-Haise em Piri-piri – PI no período chuvoso. Já no período seco, o método de Ivanov tem maior tendência de superestimar a ET_0 , segundo o mesmo autor.

Com relação ao método de Hargreaves e Samani (Figura 1), observou-se que este apresentou ao longo da série histórica, estimativas que subestimaram e superestimaram os valores de ET_0 estimados pelo método padrão. Considerando o período seco e chuvoso, Ribeiro, Simeão e Santos (2016) descreveram o mesmo comportamento.

6 CONCLUSÕES

Dentre os métodos de estimativa da evapotranspiração avaliados em relação ao método de Penman-Monteith, para o município de Petrolina-PE, o que apresentou melhor desempenho foi o método de Jensen-Haise, que utiliza como dados de entrada radiação solar global e a temperatura média do ar.

7 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão das bolsas aos autores. A Embrapa Semiárido, que forneceu os dados meteorológicos para a realização deste trabalho.

8 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 301 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ARAÚJO, W. F.; COSTA, S. A. A; SANTOS, A. E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) para Boa Vista, RR. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 84-88, 2007.
- BISPO, R. C. **Análise comparativa da evapotranspiração de referência estimada por diferentes métodos no município de Juazeiro, Bahia**. 2012. 31 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Universidade do Estado da Bahia, Juazeiro, 2012.
- BORGES JÚNIOR, J.C.; ANJOS, R.J.; SILVA, T.J.A.; LIMA, J.R.S.; ANDRADE, C.L.T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 4, p. 380-390, 2012.
- 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.
- CAVALCANTE JUNIOR, E.G.; OLIVEIRA, A.D.; ALMEIDA, B.M.; SOBRINHO, J.E. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. **Revista Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, p. 1699-1708, 2011.
- FERRONATO, A.; CHIG, L.A.; GOULART, D.B.; CAMPELO JÚNIO, J.H.; PEREIRA, L.C.; BIUDES, M.S. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Santo Antônio do Leverger-MT. **Revista de Ciências Agroambientais**, Alta Floresta, v. 14, n. 1, p. 110-118, 2016.
- IELER, J.; NEVES, L.O.; SANTOS, B.M.C.; GREIN, M.A.; SANGUANINI, G. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a região do Alto Vale do Itajaí, SC. In: VIII Mostra Nacional de Iniciação Científica e Tecnológica Interdisciplinar, 2015, Sombrio. Anais do evento (ISSN 2316-7165). Disponível em: <<http://eventos.ifc.edu.br/micti/wp-content/uploads/sites/5/2015/10/M%C3%89TODOS-DE-ESTIMATIVA-DA-EVAPOTRANSPIRA%C3%87%C3%83O-DE-REFER%C3%8ANCIA-DI%C3%81RIA-PARA-A-REGI%C3%83O-DO-ALTO-VALE-DO-ITAJA%C3%8D-SC.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 332 p.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 89, p. 15-41, 1963.

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

RIBEIRO, A.A.; SIMEÃO, M.; SANTOS, A.R.B. Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência no período chuvoso e seco em Piripiri (PI). **Revista Agroambiental**, Pouso Alegre, v. 8, n. 3, p. 89-100, set. 2016.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, p. 1-12, 1996.

SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; FOLEGATTI, M.V.; PEREIRA, F.A.C.; VILLA NOVA, N.A.; MAGGIOTTO, S. R. Variação sazonal do parâmetro de Priestley-Taylor para estimativa diária da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 49-53, 2000.

SILVA, V.J.; CARVALHO, H.P.; DA SILVA, C.R.; DE CAMARGO, R.; TEODORO, R.E.F. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária em Uberlândia, MG. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 1, p. 95-101, 2011.

SILVA, V.P.R.; BELO FILHO, A.F.; SILVA, B.B.; CAMPOS, J.H.B.C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 547-553, 2005.

VILLA NOVA, N.A.; PEREIRA, A.B. Ajuste do método de Priestley-Taylor às condições climáticas locais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 395-405, 2006.

WILLMOTT, C.J.; CKLESON, S.G.; DAVIS, R.E. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.