

ISSN 0104-1347

Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí

Reference evapotranspiration methods for Parnaíba and Teresina, Piauí State, Brazil

Aderson Soares de Andrade Júnior¹, Edson Alves Bastos², Paulo César Sentelhas³ e Ana Alexandrina Gama da Silva⁴

Resumo - O objetivo deste trabalho foi ajustar métodos para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), na escala diária, para Parnaíba e Teresina, PI. Utilizaram-se dados meteorológicos diários referentes aos períodos de 1990 a 1999, em Parnaíba, e de 1977 a 2000, em Teresina, obtidos nas Estações Climatológicas do INMET – Embrapa Meio-Norte. Os métodos foram ajustados a partir de correlações entre a ET_o estimada pelo método de Penman – Monteith – FAO e os valores diários de temperatura do ar, umidade relativa do ar e déficit de saturação. Para a validação dos métodos, determinaram-se os seguintes índices de desempenho estatístico: índice de Willmott (*d*), coeficiente de correlação (*r*) e coeficiente “*c*” de Camargo & Sentelhas. Os resultados obtidos mostraram que os métodos propostos proporcionaram estimativas de ET_o para Parnaíba e Teresina, PI, com boa precisão e exatidão, tendo como vantagem a facilidade de aplicação.

Palavras-chave: ET_o, método de Penman – Monteith - FAO, irrigação, balanço hídrico.

Abstract - The objective of this study was to adjust methods to estimate daily reference evapotranspiration (ET_o) for Parnaíba and Teresina, Piauí State, Brazil. Daily meteorological data from 1990 to 1999, in Parnaíba, and from 1977 to 2000, in Teresina, were used. The data were obtained from weather stations belonged to INMET – Embrapa Meio-Norte. The methods were adjusted using correlations between FAO – Penman – Monteith ET_o and air temperature, relative humidity and saturation deficit. For the evaluation of the methods, the following statistical performance indexes were calculated: Willmott index (*d*), correlation coefficient (*r*) and Camargo & Sentelhas coefficient (*c*). The results showed that the proposed methods to estimate daily ET_o for Parnaíba and Teresina, Piauí State, were precise and accurate, having as advantage its easy application.

Key words: ET_o, FAO – Penman - Monteith method, irrigation, water balance.

Introdução

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) é de fundamental importância para o dimensionamento de sistemas e para o manejo da água de irrigação, o que requer a adoção de estudos, avaliações e ajustes para sua correta utilização. A escolha de um método de estimativa da ET_o depende de uma série de fatores, tais como a disponibilidade de dados

meteorológicos e a escala de tempo desejada. Métodos complexos, como o de Penman – Monteith, que apesar de ser adotado pela FAO como o método padrão de estimativa da ET_o 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 em situações específicas, como em campos experimentais.

¹Eng. Agr., Dr., Pesquisador Embrapa Meio-Norte, Caixa Postal 01, CEP 64.006-220, Teresina, PI. E-mail: aderson@cpamn.embrapa.br.

²Eng. Agr., Dr., Pesquisador Embrapa Meio Norte, Teresina, PI.

³Eng. Agr., Dr., Setor de Agrometeorologia, DCE-ESALQ/USP, Piracicaba SP.

⁴Eng^a. Agr^a, Dr., Pesquisadora Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE.

Como alternativa para solucionar o problema, destaca-se o uso dos 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 e fisicamente mais reais (PEREIRA *et al.*, 1997; 2002).

Para o Estado do Piauí, SILVA (1989) propôs um método empírico para estimativa da ETo mensal para Parnaíba, baseado no uso de elementos meteorológicos de fácil medida e comumente coletados na maioria das estações meteorológicas. Entretanto, não foi possível testá-lo pela inexistência de uma outra série temporal de dados suficiente. Além disso, o método não tem sido amplamente utilizado na região, uma vez que a estimativa de ETo na escala mensal não é apropriada para proceder-se ao manejo de água em áreas irrigadas.

O método de estimativa da ETo (mm) mensal desenvolvido por SILVA (1989), para as condições climáticas de Parnaíba, PI, tem a seguinte expressão:

$$ETo = 40,0 + 1,145 T - 63,991 UR - 3,441 \Delta s + 0,123 \Delta s^2 \quad (1)$$

em que: T é a temperatura média do ar (°C); UR a umidade relativa média do ar (décimos) e Δs o déficit de saturação de vapor d'água (mmHg). Esse método foi desenvolvido a partir de correlações entre a ETo estimada pelo método de Penman modificado pela FAO e os valores médios mensais de temperatura do ar, umidade relativa do ar e déficit de saturação. A seleção das variáveis do método foi efetuada em função da análise de variância das equações de regressão, obtidas a partir de correlações isoladas e em grupo entre a ETo e todas as variáveis climáticas usadas no trabalho (SILVA, 1989).

Com base no método de estimativa de ETo mensal para Parnaíba, Piauí, proposto por SILVA (1989), efetuou-se este trabalho com o objetivo de ajustar e adaptar métodos para estimativa de ETo na escala diária, para as condições climáticas de Parnaíba e Teresina, Estado do Piauí.

Material e Métodos

Com base no método de estimativa de ETo mensal proposto por SILVA (1989), desenvolveram-se métodos de estimativa de ETo diários a partir de

análise de regressão linear múltipla envolvendo as variáveis meteorológicas: temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR), déficit de saturação (Δs) e a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith ajustado pela FAO (ALLEN *et al.*, 1998).

Procedeu-se ao ajuste e adaptação dos métodos com e sem a utilização do termo coeficiente de saturação de vapor d'água (Δs^2), a fim de averiguar seu grau de contribuição na estimativa da ETo. A seleção das variáveis do método foi efetuada em função da análise de variância das equações de regressão, obtidas a partir de correlações isoladas e em grupo entre a ETo e todas as variáveis meteorológicas usadas por SILVA (1989), cujos resultados parciais, na escala diária, foram validados e apresentados em ANDRADE JÚNIOR *et al.* (2001; 2002).

Utilizaram-se os dados meteorológicos diários referentes aos períodos de 1990-1999, em Parnaíba, e de 1977-2000, em Teresina, obtidos nas Estações Climatológicas do INMET – Embrapa Meio-Norte, localizadas em Parnaíba (3° 5'S; 41° 47' W e 46,8 m) e Teresina (5° 5'S; 42° 48' W e 74,4 m), PI.

Em Teresina, a série histórica de dados foi subdividida em dois períodos distintos: um de 1977-1984 e outro de 1985-2000. Com os dados de 1977-1984 procedeu-se à determinação dos coeficientes das equações de regressão e com os dados do período de 1985-2000 efetuou-se a validação dos mesmos. Para Parnaíba, como o período de dados disponíveis era relativamente curto para proceder-se ao ajuste e validação dos métodos, retirou-se um ano de cada vez da análise de regressão linear múltipla, de tal maneira a utilizá-lo posteriormente na fase de teste. Assim, inicialmente retirou-se os dados meteorológicos do ano de 1990, para a validação dos métodos, e procedeu-se à determinação dos coeficientes das equações de regressão com os dados meteorológicos do período de 1991 a 1999. Em seguida, retirou-se os dados meteorológicos do ano de 1991, para a validação dos métodos, e procedeu-se ao ajuste dos métodos com os dados meteorológicos do ano de 1990 mais o período de 1992 a 1999, e assim sucessivamente.

Os seguintes índices de desempenho estatístico foram utilizados para avaliar o grau de precisão e exatidão das estimativas: índice de Willmott (d) (WILLMOTT, 1981), coeficiente de correlação (r), e coeficiente "c" de Camargo & Sentelhas (CAMARGO & SENTELHAS, 1997). O coeficiente de correlação "r" determina a precisão do método e indica o grau de dispersão dos pontos em relação à

média, o chamado erro aleatório. O índice “d” de Willmott, chamado também de índice de concordância de Willmott, determina a exatidão do método e indica o grau de afastamento dos valores estimados em relação aos valores observados. Esse índice varia de 0, para nenhuma concordância, a 1, para concordância perfeita. O coeficiente “c” de CAMARGO & SENTELHAS (1997) quantifica o desempenho do método, sintetizando de forma conjunta o resultado dos índices “d” e “r” (Tabela 1).

Além dos índices estatísticos acima mencionados, WILLMOTT (1981) estabelece que, para a adequada avaliação de métodos matemáticos, os seguintes índices também devem ser considerados:

a) Erro quadrado médio (MSE) ou sua raiz quadrada (RMSE) – erro médio produzido por um método:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \quad (2)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

em que: P_i são os valores de ETo estimados pelos métodos propostos (mm); O_i os valores de ETo estimados pelo método padrão (Penman – Monteith) (mm) e N o número de pares de valores.

O uso de RMSE tem um grande número de vantagens em relação a “r” ou “r²”. Contudo, não estabelece quais as fontes ou tipos de erros (sistemático e não sistemático) que são inerentes e/ou pertinentes aos métodos propostos. Nesse caso, é conveniente que seja processada a determinação isolada de cada tipo de erro:

Tabela 1. Critérios de interpretação do coeficiente “c” de Camargo & Sentelhas.

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

Fonte: CAMARGO & SENTELHAS (1997).

b) Erro sistemático (MSE_s) – representa a soma das fontes de erros sistemáticos provenientes das estimativas de ETo com base nas equações de regressão ajustadas ($y = a + bx$):

$$MSE_s = MSE_a + MSE_p + MSE_i \quad (4)$$

b.1) Erro sistemático aditivo (MSE_a) – resulta da sub ou superestimativa em comparação aos valores observados (ETo Penman – Monteith) em relação ao termo constante do método proposto (a):

$$MSE_a = a^2 \quad (5)$$

b.2.) Erro sistemático proporcional (MSE_p) - resulta da sub ou superestimativa em comparação aos valores observados (ETo Penman – Monteith) em relação ao termo proporcional do método proposto (b):

$$MSE_p = (b - 1)^2 \left[\frac{\sum_{i=1}^N O_i^2}{N} \right] \quad (6)$$

Como não existe uma interdependência completa entre os componentes aditivo e proporcional do MSE, torna-se importante definir essa interdependência através do MSE_i . O grau de interdependência entre o erro aditivo (a) e proporcional é dado em função da covariância entre o erro devido ao termo aditivo (a) e ao erro proporcional (b – 1):

$$MSE_i = 2a(b - 1)\bar{O} \quad (7)$$

c) Erro não sistemático (MSE_u) – desde que se tenha determinado o MSE e MSE_s , o erro não sistemático é obtido pela expressão:

$$MSE_u = MSE - MSE_s \quad (8)$$

Os erros sistemáticos e não sistemáticos inerentes aos métodos propostos podem também ser obtidos pelas expressões:

$$MSE_s = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{P}_i - O_i)^2}{N} \quad (9)$$

$$MSE_u = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \hat{P}_i)^2}{N} \quad (10)$$

sendo:

$$\hat{P}_i = a + bO_i \quad (11)$$

em que: \hat{P}_i são as estimativas de ETo efetuadas com base nas equações de regressão obtidas.

É preferível que as interpretações de MSE, MSE_c e MSE_u sejam processadas examinando-se as suas raízes quadradas – RMSE, $RMSE_c$ e $RMSE_u$, uma vez que as mesmas são definidas nas mesmas unidades de medida de O e P (mm).

Resultados e Discussão

A análise de regressão linear múltipla gerou as seguintes equações, com e sem a inclusão do termo Δs^2 :

a) Parnaíba:

$$ET_o = 0,202 T - 2,511 UR + 1,287 \Delta s + 0,483 \Delta s^2 \quad (12)$$

$$r^2 = 0,819; \text{ Erro padrão} = 0,559 \text{ mm}$$

$$ET_o = 0,180 T - 2,315 UR + 2,281 \Delta s \quad (13)$$

$$r^2 = 0,816; \text{ Erro padrão} = 0,563 \text{ mm}$$

b) Teresina:

$$ET_o = 0,0422T + 1,804UR + 1,857\Delta s - 0,0475\Delta s^2 \quad (14)$$

$$r^2 = 0,7368; \text{ Erro padrão} = 0,4640 \text{ mm}$$

$$ET_o = 0,0467T + 1,744UR + 1,716\Delta s \quad (15)$$

$$r^2 = 0,7365; \text{ Erro padrão} = 0,4643 \text{ mm}$$

em que: T é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); UR a umidade relativa do ar (décimos) e Δs o déficit de saturação de vapor d'água (kPa).

A análise de regressão foi efetuada considerando-se o coeficiente linear $a = 0$, uma vez que a tendência natural é que a ETo estimada aproxime-se de zero quanto menor for a contribuição do termo T e maior a do termo UR. Em ambos os locais, houve um ligeiro acréscimo no r^2 nos métodos com a inclusão do termo Δs^2 , o que não proporcionou uma melhoria significativa na estimativa da ETo, dada a pequena diferença no erro padrão de estimativa.

A Figura 1 mostra a relação entre os dados diários de ETo estimados pelo método de Penman – Monteith e pelos métodos propostos, com e sem o uso do termo Δs^2 , para Parnaíba e Teresina. É importante destacar que usaram-se séries de dados meteorológicos independentes para proceder-se a validação dos métodos propostos.

Houve uma pequena tendência dos métodos propostos superestimarem os valores de ETo em relação a Penman – Monteith. Com e sem o termo Δs^2 , esses erros foram de 3%, em Parnaíba, e de 2%, em Teresina. Os coeficientes de determinação (r^2), obtidos das análises de regressão lineares entre as duas estimativas de ETo, foram de 0,6966, em Parnaíba, e de 0,7926, em Teresina (com o termo Δs^2) e de 0,6756, em Parnaíba, e de 0,6873, em Teresina (sem o termo Δs^2), indicando que considerável parte da variância total dos valores de ETo é explicada pelos métodos. Contudo, a adoção do r^2 como único critério de definição da qualidade de métodos não é adequada, devido o mesmo não estabelecer o tipo e a magnitude das diferenças.

A Tabela 2 apresenta os índices de desempenho estatístico obtidos com a utilização dos métodos propostos na validação, segundo a metodologia proposta por WILLMOTT (1981) e CAMARGO & SENTELHAS (1997).

Em Parnaíba, os índices “c” de CAMARGO & SENTELHAS (1997) obtidos foram 0,770 (com Δs^2) e 0,757 (sem Δs^2), permitindo enquadrar os métodos propostos na categoria de desempenho “muito bom”. Os métodos tenderam a apresentar estimativas de ETo com maior exatidão ($d = 0,923$ e $d = 0,922$) e menor precisão ($r = 0,835$ e $r = 0,822$) em relação à ETo estimada por Penman - Monteith. Essa resposta é justificada pelos menores valores de RMSE, já que houve uma predominância do erro não sistemático ($MSE_u/MSE = 93,8\%$ e $91,7\%$) em relação ao erro sistemático ($MSE_s/MSE = 6,2\%$ e $8,3\%$), especialmente, no método sem o termo Δs^2 .

Com os dados de Teresina, constatou-se desempenho semelhante aos apresentados pelos métodos propostos para Parnaíba. Os índices “c” obtidos foram 0,815 (com o termo Δs^2) e 0,757 (sem o termo Δs^2), permitindo enquadrar o método proposto na categoria de desempenho estatístico “muito bom” (CAMARGO & SENTELHAS, 1997). Os índices $r = 0,890$ e $d = 0,915$ indicam que a equação 1 (com o termo Δs^2) apresentou maior precisão e exatidão em relação à equação 2 (sem o termo Δs^2) ($r = 0,829$ e $d = 0,913$). Contudo, isto não implica dizer que as estimativas de ETo dos métodos sejam livres de erros. De fato, a raiz quadrada do erro quadrado médio (RMSE), que especifica o erro médio produzido pelo método, foi igual a 0,635, no caso da equação 1 (com o termo Δs^2), inferior, portanto, àquela da equação 2 (sem o termo Δs^2) (RMSE = 0,652). Isto deveu-se à

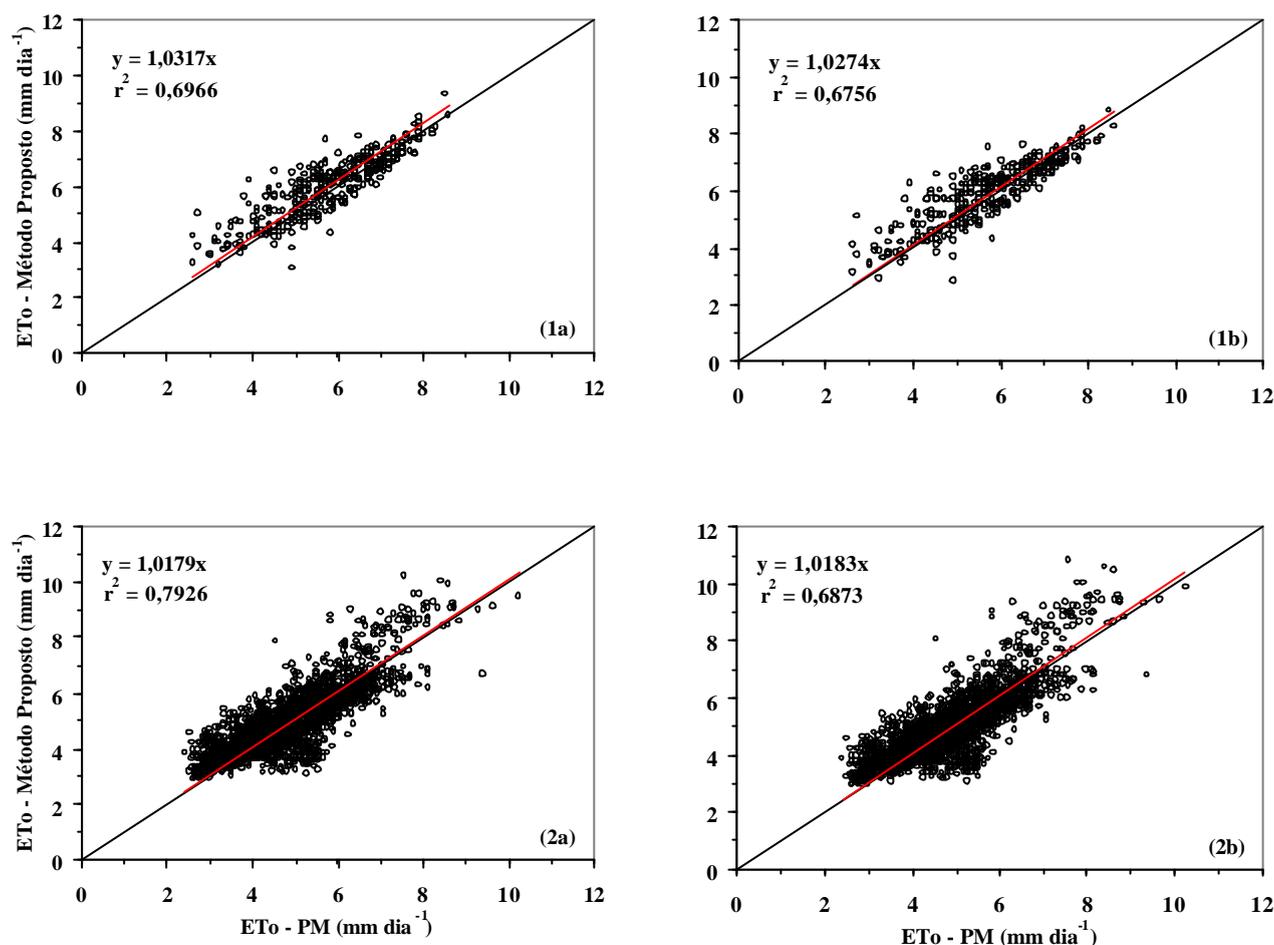


Figura 1. Relação entre a ETo diária estimada pelo método de Penman - Monteith (Eto-PM) e pelos métodos propostos, com (a) e sem (b) o termo Δs^2 , para Parnaíba (1) e Teresina (2), PI.

ocorrência de um ligeiro acréscimo no erro sistemático (RMSEs) na equação 2 (RMSEs = 0,088) em comparação à equação 1 (RMSEs = 0,086), representando apenas 1,84% (com o termo Δs^2) e 1,82% (sem o termo Δs^2) do erro médio do método (MSE_u / MSE). Os métodos propostos tenderam a apresentar estimativas de ETo com maior exatidão ($d = 0,915$ e $d = 0,913$) e menor precisão ($r = 0,890$ e $r = 0,829$) em relação à ETo estimada por Penman - Monteith. Esse desempenho é justificado pelos menores valores de RMSE, já que houve uma predominância do erro não sistemático ($MSE_u / MSE = 98,16\%$ e $98,18\%$) sobre o erro sistemático ($MSE_s / MSE = 1,84\%$ e $1,82\%$), notadamente, no método sem o termo Δs^2 .

É importante destacar que a ordem de grandeza dos erros de estimativa apresentados pelos métodos ajustados para os dois locais é perfeitamente aceitável quando pretende-se usar as estimativas de ETo para fins de dimensionamento de sistemas e para o manejo da água de irrigação, bastando, para tanto,

dispor-se de leituras diárias de temperatura do ar e umidade relativa do ar, obtidas facilmente por equipamentos simples e de baixo custo.

Conclusão

Os métodos propostos permitem estimativas de evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí, em função da temperatura do ar, umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor d'água, com boa precisão e exatidão, tendo como vantagem a facilidade de aplicação em áreas irrigadas.

Referências Bibliográficas

ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 328 p. (Paper 56).

Tabela 2 Índices de desempenho estatístico para teste dos métodos propostos para estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, PI.

Parnaíba	Equações	RMSE	RMSE _u	RMSE _s	RMSE _a	RMSE _p	RMSE _i
	1	0,645	0,618	0,186	0,000	0,186	0,000
	2	0,645	0,624	0,161	0,000	0,161	0,000
	Equações	MSE _u /MSE	MSE _s /MSE	MSE _p /MSE	d	r	c
	1	0,917	0,083	0,083	0,923	0,835	0,770
	2	0,938	0,062	0,062	0,922	0,822	0,757
Teresina	Equações	RMSE	RMSE _u	RMSE _s	RMSE _a	RMSE _p	RMSE _i
	3	0,635	0,630	0,086	0,000	0,086	0,000
	4	0,652	0,646	0,088	0,000	0,088	0,000
	Equações	MSE _u /MSE	MSE _s /MSE	MSE _p /MSE	d	r	c
	3	0,982	0,018	0,018	0,915	0,890	0,815
	4	0,982	0,018	0,018	0,913	0,829	0,757

1 e 3 = método com Δs^2 e 2 e 4 = método sem Δs^2 ; RMSE expressos em mm; N = 2555 (Parnaíba); N = 2920 (Teresina). MSE = erro quadrado médio; MSE_u = erro não sistemático e MSE_s = erro sistemático; Δs = déficit de saturação de vapor d'água.

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SILVA, A.A.G., SENTELHAS, P.C. Modelo de estimativa da evapotranspiração de referência para Parnaíba, PI. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOLOGIA, 12., Fortaleza, 2001. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/ UFC, 2001. v. 2, p. 567-568.

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BASTOS, E.A., SENTELHAS, P.C. Modelo de estimativa da evapotranspiração de referência para Teresina, PI. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., Salvador, 2002. **Anais ...** Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola/ UFBA, 2002. (CD-ROM).

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.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, GC. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. cap.3, p. 41-99.

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

SILVA, A.A.G. **Avaliação da eficiência de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Parnaíba, PI** Piracicaba: ESALQ/USP, 1989. 81 p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 1980.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.