



# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: [www.ufpe.br/rbgfe](http://www.ufpe.br/rbgfe)



## Avaliação do método de Penman Monteith FAO 56 com dados faltosos e de métodos alternativos na estimativa da evapotranspiração de referência no Submédio Vale do São Francisco

José Edson Florentino de Morais<sup>1</sup>; Thieres George Freire da Silva<sup>2</sup>, Luciana Sandra Bastos de Souza<sup>3</sup>, Magna Soelma Beserra de Moura<sup>4</sup>, Wellington Jairo da Silva Diniz<sup>1</sup>, Carlos André Alves de Souza<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Mestrando em Produção Vegetal, Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada - PE, [joseedson50@hotmail.com](mailto:joseedson50@hotmail.com), [wellingtonjairo@hotmail.com](mailto:wellingtonjairo@hotmail.com) <sup>2</sup>Professor Adjunto III, Agrometeorologia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada - PE, Autor correspondente, e-mail: [thigeoprofissional@hotmail.com](mailto:thigeoprofissional@hotmail.com) <sup>3</sup>Professora Assistente, Bioclimatologia, Meteorologia e Hidrologia Aplicada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada - PE, [sanddrabastos@hotmail.com](mailto:sanddrabastos@hotmail.com) <sup>4</sup>Engenheiro-Agrônomo, Pesquisadora, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Semiárido, BR 428, Km 152, Zona Rural, CP 23, CEP 56310-000, Petrolina, PE, [magna.moura@embrapa.br](mailto:magna.moura@embrapa.br) <sup>5</sup>Mestrando em Produção Vegetal, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada - PE, [carlosandre08\\_msn.com](mailto:carlosandre08_msn.com)

Artigo recebido em 10/10/2015 e aceito em 29/12/2015.

### RESUMO

Objetivou-se avaliar o desempenho do método Penman Monteith parametrizado no boletim 56 da FAO (PM-FAO56) com ausência de dados, e de métodos alternativos para a estimativa da evapotranspiração de referência no Submédio Vale do São Francisco. Foram utilizadas as variáveis meteorológicas do período de março de 2003 a abril de 2008, de cinco estações automáticas pertencentes à rede da Embrapa Semiárido. Na avaliação desse método foram consideradas diferentes combinações quanto à ausência de medição de variáveis meteorológicas (saldo de radiação, radiação solar global, temperatura e umidade relativa do ar, e velocidade do vento), e os métodos alternativos de Hargreaves e Samani, Jensen e Haise e Makkink. O desempenho foi analisado por meio de índices e erros estatísticos. Os resultados revelaram que o método PM-FAO56 possui boas estimativas dos valores de ETo quando a ausência de dados se limita às variáveis de umidade relativa do ar, para a estimativa da pressão parcial do vapor d'água, e, ou, da velocidade do vento, logo que a raiz quadrada do quadrado do erro médio foi inferior a 0,65 mm dia<sup>-1</sup>, quando não há os dados dessas duas variáveis ao mesmo tempo. A estimativa dos valores de saldo de radiação apesar da boa precisão e exatidão na maioria das estações meteorológicas ( $r^2 > 0,93$  e coeficiente angular da reta  $< 1,19$ ) eleva o erro de cálculo da ETo na região. Os métodos alternativos de Hargreaves e Samani, Jensen e Haise e Makkink não se mostraram satisfatórios na estimativa da ETo no Submédio do Vale São Francisco, em decorrência dos elevados erros (RMSE  $> 1,04$  mm dia<sup>-1</sup>).

Palavras-chave: ausência de dados meteorológicos, índices e erros estatísticos, manejo de irrigação, Semiárido.

## Evaluation of the method of FAO data 56 Monteith Penman with missing data and of alternative methods in the estimation of reference evapotranspiration in the Submedium Valley of San Francisco

### ABSTRACT

Objective to evaluate the performance of the Penman Monteith method parameterized on the 56 FAO Bulletin (PM-FAO56) with the absence of data and of alternative methods for the estimation of reference evapotranspiration in the Submedium Valley of San Francisco. Weather variables for the period March 2003 to April 2008 were used of five automatic stations belonging to the network of Embrapa semi-arid. In the evaluation of this method were considered to be different combinations as the lack of measurement of meteorological variables (radiation balance, global solar radiation, temperature and relative humidity, and wind speed), and alternative methods of Hargreaves and Samani, Jensen and Haise and Makkink. The performance was analyzed by means of indices and statistical errors. The results revealed that the PM-FAO56 has good estimates of ETo values when the absence of data is limited to the variables of relative humidity, for the estimation of the water vapor partial pressure, and, or, the wind speed, as soon as the square root of the square of the average error was less than 0.65 mm day<sup>-1</sup>, when there is no data of these two variables at the same time. The estimation of the radiation balance values despite the good precision and accuracy in most weather stations ( $r^2 > 0.93$  and angular coefficient  $< 1.19$ ) raises the miscalculation of ETo in the region. Alternative methods of

Hargreaves e Samanai, Jensen e Haise and Makkink not shown satisfactory estimate of the ETo at the Submedium Valley of San Francisco, due to the high errors (RMSE > 1.04 mm day<sup>-1</sup>).

Keywords: weather data absence, indexes and statistical errors, irrigation management, Semiarid.

## Introdução

No Brasil, a faixa territorial considerada como região Semiárida ocupa uma área de aproximadamente 969.589,4 km<sup>2</sup>, correspondendo em torno de 11,39% do território brasileiro e 60% da região Nordeste. Esta área constitui o polígono das secas, que inclui municípios de quase todos os estados do Nordeste (exceto o Maranhão), o Norte e o Nordeste do estado de Minas Gerais (CODEVASF, 2012).

A região Semiárida do Nordeste brasileiro é caracterizada pela heterogeneidade das condições naturais, como o solo, a topografia, a vegetação, as características socioeconômicas e o clima, que é a particularidade mais marcante desta região, sobretudo pela existência de um regime pluviométrico que delimita duas estações bem distintas: uma curta estação chuvosa, que se concentra de três a cinco meses, e uma longa estação seca, que tem duração de sete a nove meses, gerando um elevado índice de aridez (Araújo Filho, 1995; CODEVASF, 2012).

O principal período da estação chuvosa do Semiárido Nordestino estende-se de fevereiro a maio, e pode ser influenciado pelos oceanos tropicais e por fatores de circulação atmosférica de escala global e regional. Dos elementos que caracterizam o clima, a temperatura do ar é aquele que exerce maior efeito sobre a evapotranspiração (Teixeira, 2001). De acordo com Allen et al. (1998), este parâmetro varia entre as regiões em função da latitude e ainda, numa mesma latitude, em consequência da altitude e da distância do local em relação ao oceano.

Excluindo as áreas de altitudes elevadas, todo o Sertão de Pernambuco apresenta médias anuais de temperatura superiores à 24°C, ultrapassando os 26°C nas depressões de 200 a 250 metros de altitude (Vale do Rio São Francisco). Apesar da pequena amplitude térmica, as temperaturas mais elevadas de verão são muito significantes pela intensificação do processo de evapotranspiração, provocado pela grande quantidade de radiação solar. A homogeneidade térmica contrasta fortemente com a heterogeneidade espacial e temporal das chuvas (Teixeira, 2001; CODEVASF, 2012).

Em regiões Semiáridas, onde os recursos hídricos são limitados e seriamente ameaçados de extinção por exploração excessiva, é de extrema importância a estimativa da demanda de água das culturas com o máximo de precisão possível. Desta forma, uma boa gestão e planejamento de

recursos hídricos disponíveis podem ser atingidos (Jabloun e Sahli, 2008).

Um dos principais parâmetros do balanço hídrico utilizados para determinação da necessidade hídrica da cultura é a evapotranspiração. Esse termo é usado para descrever o processo de transferência de água para a atmosfera proveniente da evaporação do solo e transpiração dos vegetais, sendo a sua mensuração de grande importância, pois esta representa a quantidade de água a ser repostada no solo para as plantas. Essas informações são cruciais para estudos climatológicos e hidrológicos, como manejo da água, dimensionamento dos sistemas de irrigação, desenvolvimento de estratégias de manejo de acordo com as condições climáticas e hídricas do solo presentes na região (Allen et al., 1998; Sentelhas et al., 2010; Tagliaferre et al., 2010a).

Segundo Doorenbos e Kassam (1979), a evapotranspiração da cultura (ETc) representa a perda de água por uma determinada cultura sem nenhuma restrição hídrica, em qualquer estágio de desenvolvimento, sob ótimas condições agrônômicas e manejo de irrigação. A estimativa da ETc é obtida pela multiplicação da ETo pelo Kc (Sediyama, 1996). Quanto à evapotranspiração de referência (ETo), o conceito refere-se a uma cultura hipotética que se assemelha a um gramado, em crescimento ativo e mantida a uma altura uniforme de 0,12 m, sombreando completamente o terreno e sem restrição hídrica (Allen et al., 1998).

Tendo os dados sobre a demanda de água pelas culturas, faz-se necessário relacioná-los com suas características de crescimento. Neste caso, é bastante utilizado um coeficiente obtido pela relação entre a evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração de referência: o coeficiente da cultura (Kc), sugerido por Doorenbos e Pruitt (1977). O Kc representa a integração entre três características que diferenciam a evapotranspiração da cultura daquela utilizada como referência, que são: A altura da planta ou estágio de desenvolvimento, a resistência do dossel da planta e o albedo da superfície solo-cultura (Carrijo e Oliveira, 1997).

As informações dos elementos do clima registrados nas estações meteorológicas possibilita a obtenção da demanda hídrica da cultura. Além disso, informações de evapotranspiração são aplicadas na avaliação de

pontos importantes como a severidade, distribuição e frequência dos déficits hídricos em determinadas regiões (Jabloun e Sahli, 2008).

A estimativa de ETo por meio de modelos matemáticas é o processo mais comum e usual, contudo, eles apresentam problemas de precisão, principalmente pela falta de ajuste dos seus respectivos coeficientes, erros de leitura, precisão dos sensores e por serem desenvolvidos para condições climáticas e agronômicas específicas (Barros et al., 2009). Por isso, a FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação) e a Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) em seu boletim 56, padronizou o método de Penman Monteith, tornando-o modelo padrão para estimativa de ETo, sendo necessários dados climático-fisiológicos para sua aplicação (Allen et al., 1998).

A escolha de um método de estimativa da ETo depende de uma série de fatores, principalmente relacionados a disponibilidade de dados meteorológicos e a escala de tempo desejada (Lima Junior, 2010). Métodos complexos, como o de Penman Monteith FAO 56 (PM FAO 56), adotado como padrão de estimativa em escala diária, demandam um grande número de variáveis meteorológicas e, por isso, tem aplicação limitada, sendo utilizados quando há disponibilidade de todos os dados, em situações de campos experimentais e em áreas agrícolas onde há o emprego de um elevado padrão tecnológico (Andrade Júnior et al., 2003).

O modelo PM FAO 56 exige dados diários de temperatura máxima ( $t_{máx.}$ ) e mínima do ar ( $t_{mín.}$ ), umidade relativa do ar ( $UR_{ar}$ ), radiação solar global ( $R_g$ ), pressão atmosférica ( $Pa$ ) e velocidade do vento ( $u$ ). Em várias localidades esses dados são disponibilizados, porém, às vezes incompletos devido a falta de instrumentos apropriados, e em outros casos pela ausência EMA's ou EMC's próximas da área de produção. Assim, a FAO 56 recomenda basicamente a importação de dados de uma estação que está sob as mesmas condições climáticas ou a estimativa a partir de dados de  $t_{máx.}$  e  $t_{mín.}$  (Allen et al., 1998).

Nas últimas décadas, o Submédio Vale do São Francisco tem se destacado com a fruticultura irrigada, sobretudo devido à viticultura, que produz uvas para o consumo *in natura* ou para elaboração de vinhos finos, e a mangicultura, que abastece, sobretudo o mercado nacional. Essa região possui temperaturas médias elevadas e baixa amplitude ao longo do ano, que contrastam

fortemente com os baixos níveis e a heterogeneidade espaço-temporal das chuvas. Essas condições resultam numa deficiência de água que se sobressai como fator limitante para o desenvolvimento da atividade agrícola em condições de sequeiro (Teixeira, 2001; Dantas et al., 2007; CODEVASF, 2012)..

Em regiões Semiáridas, onde os recursos hídricos são limitados e manejados de maneira inadequada, é de extrema relevância a estimativa da demanda de água das culturas, visando à melhoria da gestão do uso da água (Jabloun e Sahli, 2008). Para isso, um dos principais parâmetros usado é a evapotranspiração, que representa o processo de transferência de água para a atmosfera proveniente da evaporação e transpiração do sistema solo-planta. Assim, a sua mensuração é necessária, pois esta representa a quantidade de água a ser repostada no solo para as plantas (Allen et al., 1998; Gonzalez-Dugo et al., 2009; Tagliaferre et al., 2010a Tagliaferre et al., 2010b; Egea et al., 2013).

A transferência de água de uma superfície vegetada, em âmbito agrícola, sem restrição hídrica, sob ótimas condições agronômicas e de manejo, é denominada evapotranspiração máxima da cultura (Doorenbos e Kassam, 1979; Marengo e Camargo, 2008), sendo a sua estimativa dependente do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) e da evapotranspiração de referência (ETo) (Sediyama, 1996; Gonzalez-Dugo e Mateos, 2008). O  $K_c$  representa a exigência hídrica das plantas e varia ao longo do seu crescimento a depender de características específicas da superfície vegetada (Carrijo e Oliveira, 1997; Allen et al., 2007). Por sua vez, a ETo se refere à evapotranspiração de uma cultura hipotética, em crescimento ativo, mantida a uma altura uniforme de 0,12 m, coeficiente de reflexão de 0,23, resistência a transferência de vapor d'água de  $70 \text{ s m}^{-1}$ , sombreando completamente o terreno e sem restrição hídrica, refletindo a demanda atmosférica local, podendo ser medida por meio de lisímetros instalados sob a superfície vegetada (Allen et al., 1998; Allen et al., 2007). Embora, a aplicação de modelos matemáticas é o mais comum e usual para a sua estimativa.

Nesse caso, problemas de precisão, sobretudo pela ausência de alguns equipamentos ou sensores meteorológicos nas estações convencionais ou automáticas, erros de leitura de medição ou de registro, e a falta de avaliação local de métodos alternativos acabam sendo limitações para os seus usos (Barros et al., 2009; Maes e

Steppe, 2012; Mekasha et al., 2014). Por isso, a FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação) e a Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID), em seu boletim 56, padronizou o método de Penman Monteith, tornando-o modelo padrão para estimativa da ETo (Allen et al., 1998).

Do ponto de vista prático, a escolha de um método de estimativa da ETo depende de uma série de fatores, principalmente relacionados a disponibilidade de dados meteorológicos e a escala de tempo desejada a ser aplicada (Payero e Irmak, 2006; Lima Junior, 2010; Maes e Steppe, 2012;). Métodos complexos, como o de Penman Monteith FAO56 (PM-FAO56) demandam um grande número de variáveis meteorológicas (temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, saldo de radiação, pressão atmosférica e velocidade do vento) e, por isso, tem aplicação limitada, sendo mais utilizados em situações de campos experimentais e em áreas agrícolas onde há o emprego de alto padrão tecnológico (Andrade Júnior et al., 2003). Em várias situações esses dados meteorológicos são disponibilizados, porém, às vezes incompletos devido à falta de instrumentos apropriados, e em outros casos pela ausência EMA's ou EMC's próximas da área de produção.

Em situações como essas, a FAO recomenda o uso de técnicas de preenchimento de falhas ou métodos alternativos para a estimativa da ETo (Allen et al., 1998). Mas, os seus resultados dependem da região de aplicação, logo que influenciam no desempenho do preenchimento de dados e na escolha do método alternativo. Na literatura, alguns estudos têm sido realizados com o intuito de analisar o uso de

dados faltosos ao método de Penman Monteith FAO56 para a estimativa da evapotranspiração de referência (Jabloun e Sahli, 2008; Cai et al., 2009; Sentelhas et al., 2010) e a aplicação de métodos alternativos que se baseiam em um menor número de dados meteorológicos. Todavia, não há registro desse tipo de pesquisa no Semiárido brasileiro.

Com base no exposto, objetivou-se avaliar o desempenho do método de Penman Monteith parametrizado no boletim 56 da FAO considerando dados meteorológicos faltosos, bem como a aplicabilidade de métodos alternativos mais simples, para a estimativa da evapotranspiração de referência no Submédio Vale do São Francisco.

### Material e métodos

O estudo foi realizado para o Vale do Submédio São Francisco que possui temperatura média do ar de 26°C, precipitação pluviométrica anual em torno de 500 mm, concentrada entre os meses de janeiro a maio, e evapotranspiração média de 6,3 mm dia<sup>-1</sup>. Segundo a classificação de Köppen, o clima local é do tipo BSwh', correspondendo a uma região Semiárida (Teixeira, 2001).

Foram utilizados os dados das variáveis meteorológicas coletadas durante o período de março de 2003 a abril de 2008 de cinco estações automáticas, pertencentes à rede da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Semiárido. Essas estações estão localizadas no Campo Experimental de Bebedouro (Petrolina - PE), nas Fazendas privadas da Brasil Uvas (Juazeiro - BA), Fruitfort (Petrolina - PE), Santa Felicidade (Casa Nova - BA) e Timbaúba (Petrolina - PE) (Tabela 1).

Tabela 1. Localização das Estações Meteorológicas Automáticas (EMA's), suas respectivas coordenadas e período de observação dos dados

Localização	Estação	Latitude	Longitude	Altitude	Período
Petrolina - PE	Bebedouro	09°09' S	40°22" W	~365 m	2003 - 2008
Juazeiro - BA	Brasil Uvas	09°19' S	40°11" W	~365 m	2003 - 2008
Petrolina - PE	Fruitfort	09°22' S	40°33" W	~365 m	2003 - 2008
Casa Nova - BA	Santa Felicidade	09°22' S	40°33' W	~365 m	2003 - 2008
Petrolina - PE	Timbaúba	09°13' S	40°29' W	~365 m	2003 - 2008

As estações meteorológicas foram instaladas em 2003, de modo que o período escolhido para análise (em torno dos cinco primeiros anos) deve-se à garantia de confiabilidade dos dados, evitando possíveis erros em decorrência da falta de calibração dos sensores. Os dados foram coletados a cada hora e

processados para escala diária. As variáveis monitoradas foram saldo de radiação (Rn, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), radiação solar global (Rs, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), temperatura média, máxima e mínima do ar (t<sub>méd</sub>, t<sub>máx</sub> e t<sub>mín</sub>, em °C), umidade relativa do ar (UR<sub>ar</sub>, em %) e velocidade do vento a 3 m de altura (u<sub>3</sub>, m s<sup>-1</sup>).

A ETo foi calculada por meio do método padrão proposto pela FAO, com todos os dados

medidos, e usando o software REF-ET (Allen, 2000) (Eq.1):

$$ET_{O_{PM-FAO56}} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \left( \frac{900}{t_{méd} + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

onde, ETo = evapotranspiração de referência da grama com resistência estomática de 70 m s<sup>-1</sup>, altura da cultura hipotética fixada em 0,12 m e albedo de 0,23 (mm dia<sup>-1</sup>); Δ = inclinação da curva de pressão de vapor d'água (kPa °C<sup>-1</sup>); Rn = saldo de radiação (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); G = fluxo de calor no solo (sendo igual a 0 para estimativas diárias); γ = constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>); t<sub>méd</sub> =

temperatura do ar média diária (°C); u<sub>2</sub> = velocidade do vento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>); e<sub>a</sub> = pressão parcial de vapor d'água; e<sub>s</sub> = pressão de saturação do vapor d'água; (e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>) = déficit de pressão vapor d'água (kPa).

Outros parâmetros do cálculo da ETo PM-FAO 56 foram determinados por meio de (Eq.2 a 6):

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \left( 6,108 \exp \left( \frac{17,27 \cdot t_{méd}}{t_{méd} + 237,3} \right) \right)}{(t_{méd} + 237,3)^2} \quad (2)$$

$$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} \cdot Pa \quad (3)$$

$$Pa = 101,3 \cdot \left( \frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (4)$$

$$e_s = \frac{\left( \frac{0,6108 \exp(17,27t_{máx})}{t_{máx} + 237,3} \right) + \left( \frac{0,6108 \exp(17,27t_{mín})}{t_{mín} + 237,3} \right)}{2} \quad (5)$$

$$e_a = \frac{UR_{méd}}{100} \cdot e_s \quad (6)$$

onde, t<sub>máx.</sub> = temperatura máxima do ar (°C); t<sub>mín.</sub> = temperatura mínima do ar (°C); e UR<sub>méd</sub> = umidade relativa do ar (calculada pelos valores máximos e mínimos diários); Pa = pressão atmosférica (kPa); z = elevação sobre o nível do

mar (altitude, m). Para conversão dos dados de velocidade do vento obtidos a 3m para a altura padrão de 2 m acima de uma superfície gramada foi utilizada a seguinte equação (Eq.7):

$$u_2 = u_z \left( \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)} \right) \quad (7)$$

onde u<sub>z</sub> = velocidade obtida na estação meteorológica automática (m s<sup>-1</sup>); z = altura de medição de velocidade de vento (3 m).

Para avaliação do método de PM-FAO56 com a ausência de dados e de métodos alternativos foram consideradas as condições (C): C1 - saldo

de radiação estimado (-Rn, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); C2 - radiação global estimada (-Rs, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); C3 - velocidade do vento constante (-u, m s<sup>-1</sup>); C4 - pressão parcial de vapor d'água estimada na ausência de dados de umidade relativa do ar (-e<sub>a</sub>, kPa); C5 - apenas dados de temperatura para

estimar  $R_s$  e  $e_a$ , e  $u$  constante; C6 - ausência de  $R_n$  e  $u$ ; C7 - ausência de  $R_s$  e  $u$ ; C8 - ausência de  $u$  e  $e_a$ ; C9 - Ausência de  $R_n$  e  $e_a$ ; C10 - Ausência de  $R_s$  e  $e_a$ ; C11 - Ausência do  $R_n$ ,  $u$  e  $e_a$ ; C12 - ausência de  $R_s$ ,  $u$  e  $e_a$ ; C13 - método alternativo de Hargreaves e Samani; C14 - método alternativo

de Jensen e Haise; e, C15 - método alternativo Makkink.

I) Na ausência de dados  $R_n$  foi estimativa utilizando as equações (Allen et al., 1998) (Eq.8 a 15):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (8)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (9)$$

$$R_{nl} = \left[ \sigma \left( \frac{(t_{\text{máx}} + 273,16)^4 + (t_{\text{mín.}} + 273,16)^4}{2} \right) \cdot (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left( 1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \right] \quad (10)$$

$$R_{so} = 0,75 R_a \quad (11)$$

$$R_a = 37,6 d_r (\omega_s \cdot \text{sen} \phi \cdot \text{sen} \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \text{sen} \omega_s) \quad (12)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left( \frac{2\pi J}{365} \right) \quad (13)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \text{sen} \left( \frac{2\pi J}{365} - 1,39 \right) \quad (14)$$

$$\omega_s = \arcsin(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (15)$$

em que,  $R_{ns}$  = radiação líquida de ondas curtas ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $R_{nl}$  = radiação líquida de ondas longas ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $R_n$  = saldo de radiação ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann ( $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $t_{\text{máx}}$  = temperatura máxima ( $^{\circ}\text{C}$ );  $t_{\text{mín}}$  = temperatura mínima ( $^{\circ}\text{C}$ );  $R_a/R_{so}$  = relação entre a radiação solar global e radiação solar global em dia de céu claro ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $R_s$  = radiação solar extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

$d_r$  = inverso do quadrado da distância Terra-Sol;  $\delta$  = declinação solar;  $\omega_s$  = ângulo solar do por-do-sol;  $\phi$  = latitude local.

II) Na ausência de dados de radiação solar global ( $R_s$ ), a sua estimativa foi feita com o uso da equação de Hargreaves, e posteriormente aplicada na eq. (9) (Allen et al., 1998) (Eq.16):

$$R_s = K_{R_s} \sqrt{(t_{\text{máx}} - t_{\text{mín}})} R_a \quad (16)$$

onde,  $R_a$  = radiação solar extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $t_{\text{máx}}$  = temperatura máxima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $t_{\text{mín}}$  = temperatura mínima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $K_{R_s}$  = coeficiente de ajuste ( $0,16 \dots 0,19$ ) ( $^{\circ}\text{C}^{-0,5}$ ). A raiz quadrada da amplitude térmica ( $t_{\text{máx.}} - t_{\text{mín.}}$ ) é relacionada à existência diária da radiação solar em uma determinada localidade. Segundo Allen et al. (1998), o coeficiente de ajuste  $K_{R_s}$  é empírico e

difere para as regiões “interioranas” ou “litorâneas”. Para regiões “interioranas”, aonde chegam massas dominantes e massas de ar não são influenciadas fortemente por uma grande massa de água,  $K_{R_s} = 0,16$ .

III) Nas situações onde foram consideradas a inexistência de dados de umidade relativa do ar, o

déficit de pressão de vapor ( $e_s - e_a$ ) foi estimado com base em dados de temperatura do ar. A pressão de saturação de vapor d'água foi calculada pela equação 6. A pressão de vapor d'água ( $e_a$ ) foi obtida assumindo que a

temperatura do ponto de orvalho ( $t_d$ ), que é próxima da temperatura mínima diária ( $t_{\min}$ ) menos 3°C, observada no início da manhã (Allen et al., 1998). Desse modo, a  $e_a$  foi calculada por (Eq.17):

$$e_a = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 \cdot (t_{\min} - 3)}{(t_{\min} - 3) + 237,3}\right) \quad (17)$$

IV) Na ausência de dados de velocidade do vento foi utilizado  $2 \text{ m s}^{-1}$  como um constante, que representa uma média de mais de 2000 estações meteorológicas ao redor do globo (Allen et al., 1998).

#### Métodos alternativos

Não há nenhum modo seguro para calcular temperatura do ar quando está estiver ausente. Então é sugerida que dados de temperatura do ar diária seja a mínima exigência de dados necessários para a estimativa da ETo (Allen et al., 1998). Assim, aplicou-se os seguintes métodos originais:

Hargreaves e Samani (Hargreaves e Samani, 1985) (Eq.18):

$$ETo = 0,0023 \cdot (t_{\text{méd.}} + 17,8) \cdot (t_{\text{máx}} - t_{\text{mín}})^{0,5} \cdot Ra \quad (18)$$

Método de Jensen e Haise (Jensen; Haise, 1963) (Eq.19):

$$ETo = R_s \cdot (0,025 \cdot t_{\text{méd}} + 0,08) \quad (19)$$

em que,  $R_s$  convertida em unidades de água evaporada (mm).

Método de Makkink (MK) (Makkink, 1957) (Eq.20):

$$ETo = R_s \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) + 0,12 \quad (20)$$

#### Avaliação do método de PM-FAO 56 com ausência de dados e dos métodos alternativos

Os resultados de ETo estimados pelo método PM FAO 56 com dados faltosos foram comparados com dados de ETo calculados com todo o conjunto de dados, de modo a se obter o desempenho do método. Todas as comparações foram realizadas por meio do emprego de

regressão linear simples. As regressões foram forçadas por meio da origem.

A análise de desempenho baseou-se na metodologia sugerida por Jabloun e Sahli (2008), a qual se utiliza da raiz quadrada do quadrado do erro médio (RMSE) e do erro médio de estimativa (MBE), e adicionalmente foi calculado do índice de precisão (coeficiente de correlação,  $r$ ), utilizando as seguintes equações (Eq. 21 a 23):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ETo_{\text{est}} - ETo_{\text{FAO PM 56}})^2} \quad (21)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ETo_{\text{est}} - ETo_{\text{FAO PM 56}}) \quad (22)$$

$$r = \frac{[\sum ET_{O_{FAO\ PM\ 56}} (ET_{O_{est}} - \overline{ET_{O_{est}}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{O_{FAO\ PM\ 56}} - \overline{ET_{O_{est}}})^2 \sum_{i=1}^n (ET_{O_{est}} - \overline{ET_{O_{est}}})^2}} \quad (23)$$

onde, n = número de observações dos valores de  $ET_{O_{FAO\ PM\ 56}}$  e  $ET_{O_{est}}$ , que, respectivamente, representam os valores diários de ETo estimados com os dados completos e com variáveis faltosas, bem como pelos métodos alternativos. A barra sobre estes símbolos refere-se ao valor médio dos dados considerados.

O MBE obtido em  $mm\ dia^{-1}$  é utilizado para quantificar a sub ou superestimativa dos valores de  $ET_{O_{est}}$  a longo prazo, enquanto que o RMSE também obtido em  $mm\ dia^{-1}$ , fornece subsídios sobre o desempenho destes valores a curto prazo. O índice “d” indica o grau de exatidão entre os valores  $ET_{O_{FAO\ PM\ 56}}$  e  $ET_{O_{est}}$ , sendo que quanto mais próximo de 1, maior é a exatidão. Já o coeficiente “r” indica o grau de

dispersão dados obtidos em relação à média, variando de -1 a +1, de modo que, quanto mais próximos dos extremos, melhor a correlação da  $ET_{O_{est}}$  com a  $ET_{O_{PM\ FAO\ 56}}$ , e quanto mais próximo de zero, menor a correlação. Os sinais indicam se a correlação é negativa ou positiva.

Para classificar o desempenho do método PM FAO 56 na determinação da ETo com dados faltosos, bem como o de métodos alternativos em relação ao método PM FAO 56 com o uso do conjunto de dados completo na estimativa da ETo, foi calculado o índice de confiança (c), sugerido por Camargo e Sentelhas (1997), o qual é resultado do produto entre o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância (d), conforme equação abaixo (Eq.24):

$$c = r \cdot d \quad (24)$$

Tabela 2. Critério de interpretação do desempenho do método de PM FAO 56 na estimativa da evapotranspiração pelo índice de confiança “c” de Camargo e Sentelhas (1997)

Coeficiente de confiança “c”	Classificação
>0,85	Ótimo
0,76-0,85	Muito bom
0,66-0,75	Bom
0,61-0,65	Mediano
0,51-0,60	Sofrível
0,41-0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

## Resultados

A estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) a partir do método de PMFAO 56 usando dados faltosos de  $R_n$  calculados pela eq. (8) apresentou alto coeficiente de determinação ( $r^2 > 0,93$  para as estações de Bebedouro, Santa Felicidade e Timbaúba), mostrando ótima precisão em relação à sua estimativa usando todos os dados meteorológicos, e boa precisão com coeficiente angular da reta (a) variando de 1,02 a 1,19 (Tabela 3). No entanto, para as estações de Brasil Uvas e Fruit Fort, as

estimativas de ETo na ausência do dados medidos de  $R_n$  resultaram no aumento da dispersão dos dados, com diminuição do  $r^2$  (0,27 a 0,39), indicando que deve ser realizado um ajuste dos valores de  $R_n$  para essas duas estações. A Figura 1 confirma esse desempenho, resultando numa classificação de acordo com o índice de confiança ótimo para essas três estações (Bebedouro, Santa Felicidade e Timbaúba) (Tabela 3). Os valores de MBE variaram de  $0,14\ mm\ dia^{-1}$  a  $0,87\ mm\ dia^{-1}$  para Santa Felicidade e Timbaúba, respectivamente.

Tabela 3. Coeficiente angular (a) e coeficiente de determinação ajustado ( $r^2_{adj}$ ) da relação entre a evapotranspiração estimada pelo método de Penman Monteith, considerando todos os dados e dados faltosos:  $-R_n$  (saldo de radiação),  $-R_s(t)$  (radiação solar global estimada por de dados de temperatura,  $-ea(t_n-3)$  (pressão parcial de vapor d’água estimada por meio dos dados de temperatura mínima



menos 3°C), -u (velocidade do vento), t (estimativa usando apenas dados de temperatura); as combinações (-Rn, -u; -Rs, -u; -Rn, -ea; -Rs, -ea; - u, -ea; - Rn, - u, -ea; -Rs(t), -u, -ea); e o métodos alternativos (HG - Hargreaves e Samani; JH - Jensen e Haise; MK - Makkink)

Variável	Bebedouro		Brasil Uvas		Fruit Fort		Santa Felicidade		Timbaúba	
	a	r <sup>2</sup> <sub>adj.</sub>	a	r <sup>2</sup> <sub>adj.</sub>	a	r <sup>2</sup> <sub>adj.</sub>	a	r <sup>2</sup> <sub>adj.</sub>	a	r <sup>2</sup> <sub>adj.</sub>
-Rn	1,08	0,95	1,28	0,27	0,86	0,39	1,02	0,95	1,19	0,93
-Rs(t)	1,12	0,64	1,23	0,47	1,07	0,63	0,99	0,65	0,97	0,92
-ea(t <sub>n</sub> -3)	1,00	0,84	0,97	0,91	0,96	0,89	1,02	0,88	1,05	0,84
-u(const.)	0,95	0,87	1,02	0,83	0,98	0,87	0,99	0,93	1,10	0,72
t	0,63	0,00	0,71	0,00	0,59	0,00	0,58	0,00	0,65	0,00
- Rn, -u	1,04	0,82	1,29	0,00	0,85	0,29	1,02	0,89	1,16	0,83
- Rs(t), -u	1,08	0,37	1,25	0,09	1,06	0,29	0,98	0,53	1,07	0,56
- Rn, -ea	1,09	0,71	1,24	0,00	0,83	0,24	1,04	0,74	1,24	0,67
- Rs(t), -ea	1,13	0,00	1,19	0,00	1,04	0,00	1,00	0,00	1,16	0,07
- u, -ea	0,97	0,44	0,99	0,48	0,96	0,51	1,02	0,65	1,02	0,56
-Rn, -u, -ea	1,06	0,25	1,27	0,00	0,82	0,05	1,06	0,45	1,21	0,38
-Rs(t), -u, -ea	1,09	0,00	1,22	0,00	1,03	0,00	1,01	0,00	1,13	0,00
HG	1,07	0,06	1,24	0,00	1,04	0,00	1,01	0,05	1,12	0,17
JH	1,23	0,75	1,56	0,00	0,75	0,10	1,26	0,85	1,48	0,80
MK	1,29	0,66	1,63	0,00	0,80	0,08	1,33	0,81	1,59	0,71

Por sua vez, o desempenho observado com dados ausente de Rs calculado pela eq. (16) e aplicando na eq. (9) no cálculo do balanço de ondas curtas, foi de bom, para a estação da Brasil Uvas, a muito bom para a de Timbaúba (Tabela 3), com valores de r<sup>2</sup> entre 0,47 e 0,92, MBE variando de 0,03 mm dia<sup>-1</sup> a 1,08 mm dia<sup>-1</sup>, e RMSE de 0,55 a 1,21 mm dia<sup>-1</sup> (Figura 1). Essa condição promoveu uma melhoria da estimativa da ETo para as estações de Fruit Fort e Brasil Uvas, e piorou o desempenho das outras três estações.

Quando se avaliou a estimativa da ETo com dados faltosos de umidade relativa do ar, sendo a pressão parcial do vapor d'água (e<sub>a</sub>) calculada pela eq. (17), o desempenho em todas as estações foi ótimo (Tabela 4), com precisão de estimativa elevada e inclinação da reta variando de 0,97 a 1,05 (Tabela 3). Além disso, os valores de r<sup>2</sup> foram superiores 0,84 para todas as estações. O MBE e o RMSE variaram de -0,07 a 0,16 mm dia<sup>-1</sup> e 0,33 a 0,48 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 1).

Na condição em que dados de velocidade do vento são faltosos (-u) (Tabela 2), assumindo valor médio de u<sub>const</sub> = 2 m s<sup>-1</sup>, o desempenho do método de PM-FAO56 também foi ótimo (Tabela 3), mostrando-se uma boa opção para estimativa da ETo, com inclinação da reta variando de 0,95 a 1,10 e r<sup>2</sup> entre 0,72 e 0,99.

Ainda na Tabela 2, quando somente os registros de temperatura estão disponíveis, sendo a ETo calculada usando o procedimento proposto por Allen et al. (1998), considerando uma velocidade do vento média constante (2 m s<sup>-1</sup>) e a pressão parcial do vapor d'água estimada com dados de temperatura mínima, o desempenho em todas as estações foi classificado como “péssimo” e “mau” (Tabela 3), baixa precisão de estimativa, e os erros MBE, variando de -1,87 a -0,98 mm dia<sup>-1</sup> e RMSE de 1,35 a 2,10 mm dia<sup>-1</sup>.

Combinando as condições de ausência de dados como -R<sub>n</sub> e -u, os desempenhos e os erros de estimativa da ETo são muito semelhantes aos da condição em que apenas os dados de R<sub>n</sub> são faltosos, demonstrando que a ausência da velocidade do vento admitida conforme sugerida por Allen et al. (1998) não influenciou significativamente no cálculo da ETo.

Para a condição em que Rs e u são faltosos, mostrou-se também semelhante à condição em que apenas Rs estava ausente, exceto para a estação de Brasil Uvas na qual o desempenho foi “sofrível” com baixos valores de r<sup>2</sup>, erros expressivos (MBE e RMSE com valores de 1,19 e 1,40 mm dia<sup>-1</sup>).

O desempenho observado para condições em que R<sub>n</sub> e e<sub>a</sub> são faltosos (Tabela 2) mostra que nas estações Brasil Uvas e Fruit Fort houve baixa precisão de estimativa, alta dispersão dos dados e

erros subestimando e superestimando a estimativa da ETo ( $r^2 = 0,00$  a  $0,24$  e MBE =  $-0,70$  a  $1,21$  mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente). Para as demais estações o desempenho foi melhor, tendo classificações como muito bom e ótimo, apesar de algumas estações o MBE ter atingido  $1,19$  mm dia<sup>-1</sup>, e a inclinação da reta de  $1,24$ , em Timbaúba.

Na ausência dos dados de  $e_a$  e  $R_s$ , verificou-se um desempenho fraco na estimativa da ETo, variando de mediano a bom, com elevada dispersão dos dados ( $r^2 = 0$ ), e MBE e RMSE atingindo valores de  $1,01$  mm dia<sup>-1</sup> e  $1,22$  mm dia<sup>-1</sup> na estação Brasil Uvas.

Com dados faltosos de  $u$  e  $e_a$ , o desempenho da estimativa da ETo variou de bom, para a estação de Bebedouro, a muito bom, para as demais estações. Apesar dos valores de  $r^2$  terem variado de  $0,44$  a  $0,65$ , a exatidão se manteve elevada com inclinação da reta em um intervalo entre de  $0,96$  a  $1,02$ , e os valores de MBE e RMSE sendo superiores a  $0,22$  mm dia<sup>-1</sup> (estação de Timbaúba) e a  $0,74$  (estação de Bebedouro), nessa ordem.

Na ausência de dados de  $R_n$ ,  $u$  e  $e_a$  a tendência dos resultados para as estações Brasil Uvas e Fruit Fort foi semelhante ao desempenho observado com dados faltosos de  $R_n$  e  $e_a$ . Essa combinação também demonstrou baixa precisão, alta dispersão dos dados e erros subestimando e

superestimando a estimativa da ETo. Para as demais estações, o desempenho foi de bom (Bebedouro e Timbaúba) a muito bom (Santa Felicidade), no entanto, a dispersão ainda se manteve alta, a precisão baixa e erros superestimando a estimativa da ETo.

Na combinação de ausência de dados de  $R_s$ ,  $u$  e  $e_a$  houve uma evidente dispersão dos valores de estimativa de ETo, com desempenho mau ou sofrível, elevada dispersão dos dados ( $r^2 = 0$ ), baixa precisão e erros considerados elevados para estimativas diárias (MBE =  $0,23$  a  $1,16$  mm dia<sup>-1</sup> e RMSE =  $1,03$  e  $1,22$  mm dia<sup>-1</sup>), mostrando que essa combinação de ausência de dados não é uma boa opção de estimativa de ETo para essas estações.

Por sua vez, a avaliação dos métodos alternativos como o de Hargreaves e Samani, originalmente desenvolvido para regiões semiáridas, não teve bom desempenho na estimativa da ETo, apresentando alta dispersão dos dados, com coeficientes de determinação ( $r^2$ ) menores que  $0,17$ . O desempenho variou de sofrível (na estação de Fruit Fort) a bom (nas estações de Bebedouro e Timbaúba), e os erros atingindo valores elevados para estimativas diárias (MBE =  $0,18$  a  $1,18$  mm dia<sup>-1</sup> e RMSE =  $0,82$  a  $1,46$  mm dia<sup>-1</sup>).

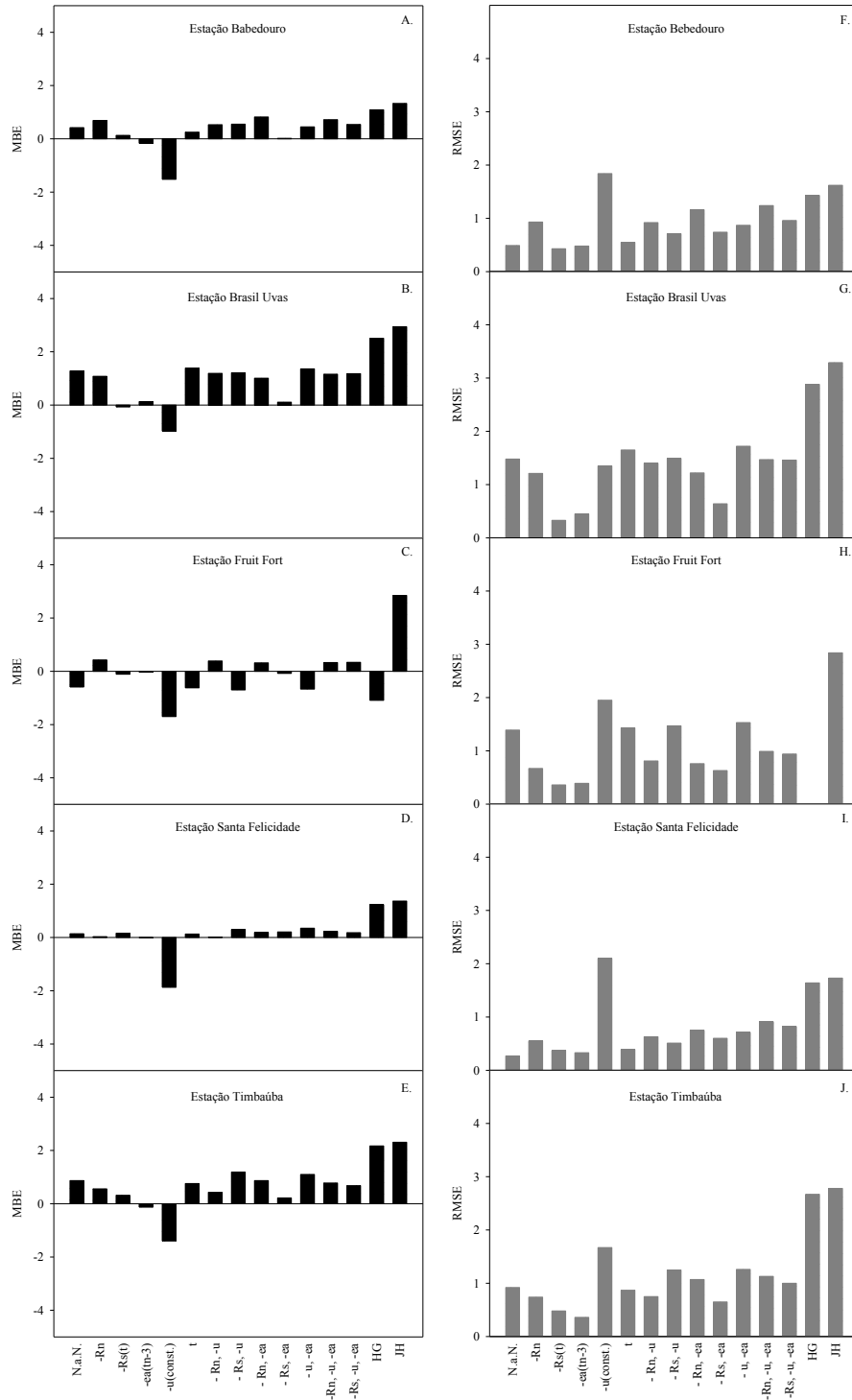


Figura 1. Erro médio de estimativa (MBE, mm dia-1) e raiz quadrada do quadrado do erro médio (RMSE, mm dia-1) da relação entre a evapotranspiração estimada pelo método de Penman Monteith, considerando todos os dados e dados faltosos:  $-R_n$  (saldo de radiação),  $-R_s(t)$  (radiação solar global estimada por de dados de temperatura),  $-ea(tn-3)$  (pressão parcial de vapor d'água estimada por meio dos dados de temperatura mínima menos 3°C),  $-u$  (velocidade do vento),  $t$  (estimativa usando apenas dados de temperatura); as combinações  $(-R_n, -u; -R_s, -u; -R_n, -ea; -R_s, -ea; -u, -ea; -R_n, -u, -ea; -R_s(t), -u, -ea)$ ; e o métodos alternativos (HG - Hargreaves e Samani; JH - Jensen e Haise; MK - Makkink).

Tabela 3. Classificação do índice de confiança da relação entre a evapotranspiração estimada pelo método de Penman Monteith, considerando todos os dados e dados faltosos: -Rn (saldo de radiação), -Rs(t) (radiação solar global estimada por dados de temperatura, -ea( $t_n-3$ ) (pressão parcial de vapor d'água estimada por meio dos dados de temperatura mínima menos 3°C), -u (velocidade do vento), t (estimativa usando apenas dados de temperatura); as combinações (-Rn, -u; -Rs, -u; -Rn, -ea; -Rs, -ea; -u, -ea; -Rn, -u, -ea; -Rs(t), -u, -ea); e o métodos alternativos (HG - Hargreaves e Samani; JH - Jensen e Haise; MK - Makkink)

	Bebedouro	Brasil Uvas	Fruit Fort	Santa Felicidade	Timbaúba
-Rn	Ótimo	Sofrível	Mau	Ótimo	Ótimo
-Rs(t)	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
-ea( $t_n-3$ )	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
-u(const.)	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
t	Mau	Mau	Péssimo	Péssimo	Mau
- Rn, -u	Ótimo	Mau	Péssimo	Ótimo	Muito Bom
- Rs, -u	Bom	Sofrível	Bom	Muito Bom	Muito Bom
- Rn, -ea	Ótimo	Mau	Péssimo	Ótimo	Bom
- Rs, -ea	Mediano	Mediano	Bom	Bom	Bom
- u, -ea	Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
-Rn, -u, -ea	Bom	Péssimo	Péssimo	Muito Bom	Bom
-Rs, -u, -ea	Mau	Mau	Mau	Sofrível	Sofrível
HG	Bom	Mau	Sofrível	Mediano	Bom
JH	Bom	Péssimo	Péssimo	Bom	Sofrível
MK	Mediano	Péssimo	Péssimo	Bom	Mau

No entanto, os valores de RMSE foram relativamente elevados para todos os locais e variou de 0,58 para 0,96 mm dia<sup>-1</sup>. O desempenho dos métodos de Jensen e Haise e Makkink foi semelhante ao de Hargreaves e Samani, que no geral apresentou elevada dispersão dos valores de estimativas, inclinação da curva de regressão e erros variando de “a” de 0,75 até 1,56 e MBE de -1,09 a 2,51 mm dia<sup>-1</sup> (Jensen e Haise) e “a” de 0,80 até 1,63, MBE de -0,84 até 2,88 mm dia<sup>-1</sup> (Makkink).

Os valores médios de RMSE de todas as estações para cada condição de ausência de dados foram adotados na classificação para escolha da combinação que resulta em melhores estimativas ETo pelo método de PM-FAO56, e dos métodos alternativos (Tabela 4). Com esse critério foi verificado menores valores de RMSE para as condições de ausência de dados de -ea, -u e a combinação -ea e -u. A ausência de dados de Rn relevaram apenas o 6º melhor desempenho entre as 15 condições avaliadas. Os métodos alternativos apresentaram elevados valores de RMSE, resultando em baixos desempenhos para a região. Percebe-se que, à medida que aumenta a ausência de dados, de uma para três, a magnitude dos valores de RMSE tende a ser incrementada.

## Discussão

O avanço tecnológico tem levado ao surgimento de inúmeras redes de estações automáticas. Exemplo disso é verificado no estado de Pernambuco, que possui 12 automáticas (EMA - estação meteorológica automática) do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, e 23 plataformas de coletas de dados (PCD) vinculadas à Agência pernambucana de Águas e Clima - APC. Todavia, muitas tem apresentado problemas, sobretudo àquelas da APAC que tem registado dados inconsistentes de alguns elementos. Nesse contexto, a estimativa da ETo pode ser comprometida.

Esses tipos de estações meteorológicas apresentam melhor resolução temporal, qualidade e continuação de suas medidas, mas podem ser alteradas em função da ação do tempo e da exposição de seus sensores, os quais estão sujeitos a danos físicos como interferência de sinal, desconexão de cabos e sua oxidação, resultando assim, em dados com baixa precisão (Strassburger et al., 2011). Assim, a estimativa da ETo com ausência de uma das variáveis meteorológicas pode ser necessária, de tal modo que é interessante avaliar os seus efeitos sobre o cálculo da demanda atmosférica, sobretudo utilizando métodos mais complexos como o de PM-FAO56.

Sentelhas et al. (2010), avaliando o desempenho do método de PM-FAO56 para doze locais do Sul de Ontário, Canadá, encontraram  $r^2$

entre 0,44 e 0,69, quando estimaram a ETo com dados faltosos de Rs. Para oito localidades na Tunísia, Jabloun e Sahli (2008) verificaram que mesmo com a estimativa da Rs houve um ótimo desempenho na estimativa dos valores de ETo ( $r^2$  superior a 0,95 para todas as estações), resultando em valores de MBE que variaram entre 0,022 a 0,153 mm dia<sup>-1</sup>. Com isso, mesmo Rs, sendo uma das variáveis mais importantes no processo de evapotranspiração, a sua estimativa em ambiente semiárido não tem mostrado tanto prejuízos.

Na ausência do sensor de umidade relativa do ar para a estimativa da  $e_a$ , no estudo de Jabloun e Sahli (2008) para a Tunísia, para localidades de clima Semiárido os coeficientes de correlação  $r^2$  foram superiores a 0,98, e valores dos erros também foram baixos (MBE e RMSE variando de 0,078 a 0,212 mm dia<sup>-1</sup> e 0,233 a 0,303 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente). Os índices estatísticos aqui obtidos ainda são semelhantes aos observados por Popova et al. (2006) e Cai et al. (2007) em seus cálculos de estimativa de ETo com dados limitados.

Tabela 4. Raiz quadrada do quadrado do erro médio (RMSE, mm dia<sup>-1</sup>) para classificação das condições de estimativa da evapotranspiração pelo método de Penman Monteith com dados faltosos: -Rn (saldo de radiação), -Rs(t) (radiação solar global estimada por de dados de temperatura, -ea(t<sub>n</sub>-3)) (pressão parcial de vapor d'água estimada por meio dos dados de temperatura mínima menos 3°C), t (estimativa usando apenas dados de temperatura); as combinações (-Rn, -u; -Rs, -u; -Rn, -ea; -Rs, -ea; -u, -ea; -Rn, -u, -ea; -Rs(t), -u, -ea); e os métodos alternativos (HG – Hargreaves e Samani; JH – Jensen e Haise; MK – Makkink)Rs

Classificação	Condição de ausência de dados	RMSE
1	PM FAO56 (-ea(t <sub>n</sub> -3))	0,39
2	PM FAO56 (-u)	0,40
3	PM FAO56 (- u, -ea)	0,65
4	PM FAO56 (-Rs(t))	0,82
5	PM FAO56 (-Rs(t), -u)	0,90
6	PM FAO56 (-Rn)	0,91
7	PM FAO56 (- Rn, -u)	0,98
8	PM FAO56 (- Rs, -ea)	0,99
9	Método alternativo HG	1,04
10	PM FAO56 (- Rn, -ea)	1,09
11	PM FAO56 (-Rs, -u, -ea)	1,15
12	PM FAO56 (-Rn, -u, -ea)	1,22
13	Método alternativo JH	1,56
14	PM FAO56 (apenas t)	1,78
15	Método alternativo MK	2,45

Jabloun e Sahli (2008) e Sentelhas et al. (2010) encontraram valores de  $r^2$  superiores a 0,96, na ausência dos dados de velocidade do vento, com erros pequenos, indicando que não houve tendência de superestimar ou subestimar a ETo, e os valores de RMSE foram inferiores a 0,40 e 0,30 mm dia<sup>-1</sup>, nessa ordem. Resultados semelhantes quanto a pouca influência dos valores constantes de velocidade do vento foi observada por Sentelhas et al. (2010).

Na condição de ausência de  $e_a$  e Rs na estimativa da ETo também não foi considerada

uma boa opção em Ontário, Canadá, segundo Sentelhas et al. (2010), com  $r^2 < 0,6$  e RMSE alcançando 1,4 mm dia<sup>-1</sup>.

Por sua vez, esses mesmos encontraram melhores valores de  $r^2$  (0,80 a 0,94), mas a inclinação e o RMSE foram bem semelhantes aos observados no presente estudo em relação a ausência dos valores de u e  $e_a$  ao mesmo tempo (a = 1 a 1,17; RMSE = 0,42 a 0,66 mm dia<sup>-1</sup>). Ao passo que, analisando a ausência da combinação Rs, u e  $e_a$ , também observaram baixa precisão (de

até 1,32) e dispersão expressiva dos dados ( $r^2$  menores que 0,47).

O método de Penman-Monteith FAO-56 é usado como padrão na quantificação da ETo diária (Allen et al., 1998). Porém, a principal dificuldade encontrada é o fato de requerer medidas acuradas de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e do saldo de radiação (Pereira et al., 2002; Popova et al., 2006), dados estes que muitas vezes não estão disponíveis para os produtores, devido a ausência de aparelhos para sua quantificação ou pela falta de tecnologia adequada na sua disseminação (Araújo et al., 2011). Para contornar esse problema, a busca por métodos que necessitem de um menor número de variáveis meteorológicas para a estimativa da ETo tem sido uma solução viável (Fernandes et al., 2012).

Diversos métodos empíricos foram desenvolvidos para a estimativa da ETo por meio de um menor número de variáveis, desde àqueles mais simples como o método de Thornthwaite (1948), Jensen e Haise (1963), Hargreaves e Samani (1985) e Hargreaves (1974), que necessitam dados como a temperatura do ar, até o mais complexo, que são compostos por componentes do balanço de energia como o Penman-Monteith, Priestley e Taylor (1972), Makkink (1957), os quais requerem maior número de variáveis (Vescove e Turco, 2005; Souza et al., 2010).

Apesar disso, não se tem um consenso de um único método para a estimativa da ETo, mesmo quando em localidades de climas semelhantes, fazendo-se necessário assim, a calibração destes modelos para cada região (Dehghanisanij et al., 2004; Gonçalves et al., 2009; Fernandes et al., 2012).

A escolha de um modelo para a estimativa da ETo, muitas vezes se torna difícil em função da baixa quantidade de dados disponíveis ou até mesmo pela falta de conhecimento do produtor de como realizar a sua estimativa. Assim, o conhecimento sobre as variáveis meteorológicas de maior efeito sobre a ETo pode auxiliar na escolha do método a ser utilizado, proporcionando assim a seleção de métodos que atendam com exatidão à demanda atmosférica de cada localidade. A contribuição de elementos do tempo na ETo, visando a sua aplicação no ajuste de métodos de estimativa da ETo, é de fundamental relevância dentro do contexto do manejo de água na agricultura, uma vez que a evapotranspiração é bastante dinâmica e varia tempo-espacialmente.

No presente estudo, os métodos alternativos sem calibração de seus parâmetros localmente apresentaram péssimo desempenho

(Tabela 4), o que sugere estudos detalhados para melhoria de suas estimativas.

Segundo Sentelhas et al. (2010), como esse método é empírico e baseado apenas em dados de temperatura, a precisão das estimativas tende de ser reduzida. Esses autores encontraram valores de  $r^2$  variando entre 0,46 e 0,7, e RMSE entre 0,76 e 1,96 mm dia<sup>-1</sup>, em Ontário, Canadá. Jabloun e Sahli (2008) verificaram que esse método apresenta boa precisão para sua aplicação na maioria dos locais avaliados na Tunísia, quando encontraram valores de  $r^2$  entre 0,91 e 0,95, e a inclinação da reta foi próxima a 1,0.

Para o município de Eunápolis - BA, Tagliaferre et al. (2010b) observaram que métodos alternativos como o de Hargreaves e Samani foi caracterizado como mediano ( $c = 0,60$ ), resultando alto valor de estimativa do erro padrão (1,30 mm dia<sup>-1</sup>) e superestimava de 0,94 mm dia<sup>-1</sup>, correspondendo a 23%. Segundo esses autores apresentar da simplicidade de uso desses métodos, a sua adoção deverá ser feita com cautela, ou seja, poderá ser utilizado desde que se utilize um coeficiente de ajuste ou correção para evitar superestimativa no consumo de água pelas culturas.

Segundo Tagliaferre et al. (2010b) a baixa precisão e exatidão da estimativa da evapotranspiração de referência pode implicar em aumento do desperdício de água na irrigação, elevando os custos de produção do sistema agrícola. Tagliaferre et al. (2010a) menciona que com o advento da tecnologia empregada nas estações meteorológicas automáticas que permitem medir e registrar os elementos meteorológicos em frações de tempo cada vez menores, o emprego das equações empíricas de estimativa da evapotranspiração de referência ganhou importância, devido a facilidade com que os dados são manipulados e por estarem disponíveis em meios eletrônicos de fácil acesso. No entanto, o uso dessas equações exige conhecimentos específicos, dificultando assim em muitos casos o seu uso.

Sentelhas et al. (2010), avaliando o desempenho método padrão Penman-Monteith FAO 56 na estimativa da evapotranspiração de referência com dados completos em relação a estimativa com dados ausentes de velocidade do vento, temperatura do ar, saldo de radiação e pressão de vapor d'água, e métodos alternativos (Priestley - Taylor, Hargreaves e Samani e Thornthwaite), com dados de doze localidades no sul de Ontário, Canadá, observaram que, quando dados de velocidade do vento foram substituídos por pelo valor médio sugerido por Allen et al. (1998) de 2 m s<sup>-1</sup> e pressão de vapor d'água

estimado a partir de dados de temperatura mínima, o método de Priestley - Taylor foi uma boa opção para estimar ETo, principalmente quando calibrado localmente. Quando se encontravam disponíveis apenas os dados de temperatura os métodos de Hargreaves e Samani e Thornthwaite ajustados eram as melhores opções para estimar ETo do que o PM FAO 56.

Silva et al. (2010), em estudo semelhante, ao avaliar o desempenho do método de PM FAO 56 na estimativa da ETo a partir de dados de  $t_{máx.}$  e  $t_{mín.}$  do ar para Campos Sales, na região do Cariri, oeste do Estado do Ceará, verificaram que o método de HG apresentou um bom desempenho, podendo ser utilizado para estimar a ETo com boa precisão.

### Conclusões

O método de Penman Monteith parametrizado no boletim 56 da FAO (PM-FAO56), de modo geral, possui boas estimativas da evapotranspiração de referência (ETo) para a região do Submédio Vale São Francisco quando a ausência de dados se limita às variáveis de umidade relativa do ar, para a estimativa da pressão parcial do vapor d'água, e, ou, da velocidade do vento. A estimativa dos valores de saldo de radiação apesar da boa precisão e exatidão na maioria das estações automáticas eleva os erros de cálculo da ETo. O aumento do número de variáveis meteorológicas ausentes no cálculo da ETo diminui a precisão e exatidão da sua estimativa. Os métodos alternativos de Hargreaves e Samani, Jensen e Haise e Makkink originais não se mostraram satisfatórios na ETo no Vale do Submédio São Francisco.

### Referências

Allen, R.G., 2000. REF-ET: Reference evapotranspiration calculator, version 2.0. University of Idaho Research and Extension Center, Kimberly.

Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, [online] 133. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(395\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(395)). Acesso: 23 set. 2015.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO, Rome (Irrigation and Drainage Paper, 56).

Andrade Júnior, A.S., Bastos, E.A., Sentelhas, P.C., Silva, A.A.G.da, 2003. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 11, 63-68.

Araújo, G.L., Reis, E.F., Moreira, G.R., 2011. Correlações entre variáveis climatológicas e seus efeitos sobre a evapotranspiração de referência. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* 5, 96-104.

Barros, V.R., Souza, A.P.de, Fonseca, D.C., Silva, L.B.D.da, 2009. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* [online] 4. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v4i2a13>. Acesso: 15 ago. 2015.

Cai, J., Yu, L., Lei, T., Pereira, L.S., 2007. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural Forest Meteorology* [online] 145. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.04.012>. Acesso: 15 ago. 2015.

Camargo, A.P., Sentelhas, P.C., 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 5, 89-97.

Carrizo, O.A., Oliveira, C.A.S., 1997. Irrigação de hortaliças em solos cultivados sob proteção de plástico. Embrapa Hortaliças, Brasília. (Circular Técnica, 10).

CODEVASF. Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Vale do Parnaíba, 2012. Polígono das secas. Disponível: <http://www.codevasf.gov.br/osvales/vale-do-sao-francisco/poligono-das-ecas>. Acesso: 27 nov. 2012.

Dantas, B.F., Pereira, M.S., Ribeiro, L.deS., Maia, J.L.T, Silva, D.J., Duenhas, L.H., Lima, M.A.C. de, Bassoi, L.H., 2007. Metabolic responses of guava trees irrigated with different N and K levels in São Francisco Valley. *Revista Brasileira de Fruticultura* [online] 29. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452007000200026>. Acesso: 15 ago. 2015.

Dehghanisanij, H., Yamamotoa, T., Rasiah, V., 2004. Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments. *Agricultural Water Management* [online] 64. Disponível: <http://>

- dx.doi.org/10.1590/S0100-29452007000200026. Acesso: 21 ago. 2015.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. FAO, Rome. (Irrigation and Drainage Paper, 33).
- Egea, G., Nortés, P.A., Domingo, R., Baille, A., Pérez-Pastor, A., González-Real, M.M., 2013. Almond agronomic response to long-term deficit irrigation applied since orchard establishment. *Irrigation Science* [online] 31. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-012-0322-8>. Acesso: 15 ago. 2015.
- Fernandes, D.S., Heinemam, A.B., Paz, R.L.F., Amorim, A.O., 2012. Calibração regional e local da equação de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de referência. *Revista Ciência Agronômica* [online] 43. Disponível: <http://www.ccarevista.ufc.br/seer/index.php/carevista/article/view/1426/679>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Gonçalves, F.M., Feitosa, H.O., Carvalho, C.M., Gomes Filho, R. R., Valmir Júnior, M., 2009. Comparação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referencia para o município de Sobral - CE. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* [online] 3. Disponível: <http://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/26>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Gonzalez-Dugo, M.P., Neale, C.M.U, Mateos, L., Kustas, W.P., Prueger, J.H., Anderson, M.C., Li, F., 2009. A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology* [online] 149. Disponível: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.agrformet.2009.06.012>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Gonzalez-Dugo, M.P., Mateos, L., 2008. Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops. *Agricultural Water Management* [online] 95. Disponível: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.agwat.2007.09.001>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Hargreaves, G.H., 1974. Estimation of potential and crop evapotranspiration. *Transactions of the ASAE* 17, 701-704.
- Hargreaves, G. H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1, 96-99.
- Jabloun, M.; Sahli, A., 2008. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: applications to Tunisia. *Agricultural Water Management* [online] 95. Disponível: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.agwat.2008.01.009>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Jensen, M.E., Haise, H.R., 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of Irrigation and Drain Engineering. Bulletin of the American Meteorological Society* 89, 15-41.
- Lima Junior, F.E.B., 2010. Análise comparativa da evapotranspiração de referência estimada por diferentes métodos no município de Limoeiro do Norte, Ceará. Dissertação (Mestrado). Fortaleza, UFC.
- Maes, W.H., Steppe, K., 2012. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *Journal of Experimental Botany* [online] 63. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/ers165>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Makkink, G.F., 1957. Ekzameno de la formula de Penman. *Neth. Journal of Agricultural Science* 5, 290-305.
- Marengo, J.A., Camargo, C.C., 2008. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960-2002. *International Journal of Climatology* [online] 28. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1584>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Mekasha, A., Tesfaye, K., Duncan, A.J., 2014. Trends in daily observed temperature and precipitation extremes over three Ethiopian eco-environments. *International Journal of Climatology* [online] 34. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3816>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Payero J.O., Irmak S., 2006. Variable upper and lower crop water stress index baselines for corn and soybean. *Irrigation Science* [online] 25. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-006-0031-2>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Pereira, A.R., Angelocci, L.R., Sentelhas, P.C., 2002. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações praticas*. Agropecuária, Guaíba.
- Popova, Z., Kercheva, M., Pereira, L.S., 2006. Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. *Irrigation and Drainage* [online] 55. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/ird.228>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review* 100, 81-92.
- Sediyama, G., 1996. Estimativa da evapotranspiração: Histórico, evolução e



- análise crítica. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 4, 1-12.
- Sentelhas, P.C., Gillespie, T.J., Santos, E.A., 2010. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontário, Canadá. *Agricultural Water Management* [online] 97. Disponível: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.agwat.2009.12.001>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Tagliaferre, C., Oliveira, R.A.de, Oliveira, E.M.de, Baptestini, J.C.B., Santos, L.daC., 2010a. Desempenho do irrigâmetro no manejo da água de irrigação na cultura do feijoeiro. *Revista Caatinga* [online] 23. Disponível: <http://periodicos.ufersa.edu.br/revistas/index.php/sistema/article/view/1687/4599>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Tagliaferre, C., Silva, R.A.deJ., Rocha, F.A., Santos, L.daC., Silva, C.dosS.da, 2010b. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis - BA. *Revista Caatinga* [online] 23. Disponível: <http://periodicos.ufersa.edu.br/revistas/index.php/sistema/article/view/1509/4530>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Teixeira, A.H.C., 2001. Informações agrometeorológicas do pólo Petrolina-PE/Juazeiro-BA. Embrapa Semiárido, Petrolina. (Documentos, 168).
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38, 55-94.
- Vescove, H.V., Turco, J.E.P., 2005. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara, SP. *Revista de Engenharia Agrícola* [online] 25. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162005000300017>. Acesso: 16 ago. 2015.
- Willmott, C.J., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research Oceans* 90, 8995-9005.