

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELO MÉTODO DE PENMAN-PICHE EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE NEBULOSIDADE PARA FLORIANÓPOLIS, SANTA CATARINA**Rosandro Boligon Minuzzi¹ & Isabella Rachadel Tridapalli²

1 - Meteorologista, Professor Associado da UFSC/Florianópolis-SC, rbminuzzi@hotmail.com

2 - Graduanda em Agronomia da UFSC/Florianópolis-SC

Palavras-chave:atmômetro
demanda hídrica
evaporação
irrigação**RESUMO**

A medida direta da evapotranspiração de referência (ET_o) é difícil e onerosa. Dentre os métodos para estimar a evapotranspiração, o de Penman-Piche é prático por necessitar apenas de dois elementos climáticos de fáceis medidas (temperatura e evaporação). Este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho da ET_o diária e pentadal, estimado pelo método de Penman-Piche em diferentes condições de nebulosidade para Florianópolis. Os dados meteorológicos diários, necessários para a estimativa da evapotranspiração pelo método de Penman-Piche (ETP_i) e de Penman-Monteith (usado como padrão), foram obtidos de 8 de agosto de 2017 a 13 de outubro de 2017. A avaliação da estimativa de ETP_i foi realizada por meio do erro padrão da estimativa; erro médio; coeficientes de correlação e de determinação da Regressão Linear; Índice de Concordância e Índice de Confiança. A avaliação da estimativa de ETP_i diária também foi realizada dividindo as datas em grupos, de acordo com a nebulosidade (céu claro, parcialmente nublado e nublado) definida pelo Índice de Claridade. Há uma tendência do método de Penman-Piche em subestimar a evapotranspiração, principalmente, quanto menor for a nebulosidade. Apenas na análise pentadal, as estimativas de ETP_i foram mais satisfatórias, principalmente, quando os valores foram calibrados, tendo um 'bom' desempenho e uma correlação 'muito alta'.

Keywords:atmometer
evaporation
irrigation
water demand**REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION BY THE PENMAN-PICHE METHOD IN DIFFERENT CLOUDINESS CONDITIONS TO FLORIANÓPOLIS, SANTA CATARINA, BRAZIL****ABSTRACT**

The direct measurement of the reference evapotranspiration (ET_o) is difficult and costly. Among methods to estimating evapotranspiration, Penman-Piche is practical because it requires only two climatic elements of easy measurements (temperature and evaporation). This study aimed to evaluate the performance of daily and pentadal ET_o estimated by the Penman-Piche method in different cloudiness conditions to Florianópolis. The daily meteorological data required for the estimation of evapotranspiration by Penman-Piche (ETP_i) and Penman-Monteith methods (used as standard) were obtained from August 8, 2017 to October 13, 2017. The evaluation of the ETP_i was performed using the standard error of the estimate, mean error, correlation and determination coefficients of the Linear Regression, Concordance Index and Confidence Index. The evaluation of the daily ETP_i estimation was also performed by dividing the dates into groups of cloudiness agreement (clear, partly cloudy and cloudy) defined by the Clearness Index. There is a tendency of the Penman-Piche method to underestimate the evapotranspiration, mainly the lower the cloudiness. In the pentadal analysis, just the estimates of ETP_i were satisfactory, especially when the values were calibrated, presenting a 'good' performance and a 'very high' correlation.

INTRODUÇÃO

A evapotranspiração é o processo simultâneo de transferência da água para a atmosfera pela transpiração e evaporação no sistema solo-planta. De acordo com Albuquerque e Durães (2008), nessa transferência de vapor d'água, os elementos climáticos controlam a força de demanda hídrica da atmosfera, atuando, no conjunto solo-planta-atmosfera, como um dreno.

Mendonça e Dantas (2008) enfatizam que o conhecimento da evapotranspiração de referência (ET_o) é fundamental para a agricultura, uma vez que permite a realização da irrigação adequada para cada cultura e época do ano, tornando assim o uso da água racional e eficiente.

Na ausência de dados medidos por lisímetros ou evapotranspirômetros, a ET_o pode ser estimada a partir de elementos climáticos aplicados em algum dos vários métodos apresentados na literatura científica. De acordo com seus fundamentos teóricos, os métodos de estimativas da ET_o podem ser separados em seis grupos citados e explicados por Pereira *et al.* (2013).

A escolha por um método de estimativa da ET_o depende de uma série de fatores, tais como: da disponibilidade de dados meteorológicos e da escala de tempo desejada (ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2003). Dentre o grande número de métodos existentes para estimativa da ET_o, a Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) consideram o método de Penman-Monteith (PM) como padrão para a estimativa desta variável, principalmente, na escala diária (ALLEN *et al.*, 1998), por combinar componentes aerodinâmicos e de balanço de energia (ALBUQUERQUE & DURÃES, 2008). A comunidade científica tem ratificado este método como o mais preciso, por fornecer estimativas mais confiáveis em qualquer condição climática (PEREIRA *et al.*, 2013).

Apesar da recomendação pelo método de PM, ele pode muitas vezes ser limitado, já que empregam um número elevado de elementos climáticos (temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e saldo de radiação) que nem sempre estão disponíveis, uma vez que

alguns deles necessitam de aparelhos de alto custo para sua determinação. Isto vai na contrapartida do atmômetro de Piche, usualmente chamado de evaporímetro de Piche, que determina o poder evaporante do ar à sombra, por estar localizado no interior do abrigo meteorológico, isto é, sem a influência da radiação solar direta. Ele é um instrumento de baixo custo, fácil instalação, leitura e manuseio que consta de um tubo de vidro de 35cm de altura e 1,5cm de diâmetro externo, graduado em 30mm com divisões a cada 0,2mm (BRAGA *et al.*, 2015).

Aliando à importância da evapotranspiração na agricultura, da avaliação de métodos de estimativa de ET_o em diferentes escalas de tempo e condições climáticas, com a praticidade na leitura do atmômetro de Piche, este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho da ET_o estimada pelo método de Penman-Piche em diferentes escalas de tempo e condições de nebulosidade para Florianópolis, estado de Santa Catarina.

MATERIAL E MÉTODOS

O período de coleta dos dados ocorreu de 8 de agosto de 2017 a 13 de outubro de 2017, na estação meteorológica do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal de Santa Catarina, localizada na cidade de Florianópolis (latitude: 27,57° Sul, longitude: 48,50° e altitude: 2 metros). De acordo com a metodologia proposta por Köppen, o clima do local é classificado como Cfa, isto é, clima subtropical constantemente úmido sem estação seca, com verão quente (temperatura média do mês mais quente sendo maior que 22°C) (ALVARES *et al.*, 2013).

Foram coletados dados horários de temperatura do ar (t), umidade relativa do ar (UR) e radiação solar global (R_g) e, na escala diária, evaporação pelo atmômetro de Piche (P_i) e velocidade do vento (U₂) pelo anemômetro de caneca instalado a seis metros de altura, sendo a leitura dos dois últimos elementos obtida às 21h TMG (Tempo Médio de Greenwich). A altura de medida da velocidade média diária do vento (das 21h TMG do dia anterior às 21h TMG do dia presente) foi ajustada para dois metros, usando a equação 1 (ALLEN *et al.*, 1998), enquanto a água e o disco de papel poroso usados no atmômetro de Piche foram substituídos uma vez por semana.

$$U_z = U_z \frac{4,87}{\ln(67,8.z - 5,42)} \quad (1)$$

em que,

U_z = a velocidade do vento (m.s⁻¹); e
 z = a altura em que foi feita a medida (m).

A evapotranspiração pelo método de Penman-Piche (ETPi) foi estimada de acordo com a equação 2 (FERNANDES *et al.*, 2011).

$$ETPi = \frac{(0,28.Pi)}{1 - W} \quad (2)$$

em que,

W = função da temperatura do ar (equações 3 e 4).

$$W=0,407+0,0145.t \quad \text{quando } 16 < t < 32^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$W=0,483+0,01.t \quad \text{quando } t < 16^\circ\text{C} \quad (4)$$

A evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (ETPM) (equação 5) foi considerada como padrão para avaliação de ETPi.

$$ETo = \frac{0,408.s(Rn - G) + \frac{\gamma \cdot 900 \cdot U_2(e_s - e_a)}{t + 273}}{s + \gamma(1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (5)$$

em que,

G = fluxo de calor no solo (MJ m⁻²) que foi considerado nulo em se tratando de estimativa diária;

γ = 0,063 k Pa °C⁻¹ é a constante psicrométrica;

Rn = a radiação líquida total diária (MJ m⁻²);

e_s = a pressão de saturação do vapor (k Pa);

e_a = a pressão real do vapor (k Pa); e

s = a declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar (k Pa °C⁻¹). Estas quatro últimas variáveis foram obtidas por equações, conforme apresentadas por Pereira *et al.* (2013).

A avaliação da estimativa de ETPi nas escalas diária e pentadal foi realizada por meio do erro padrão da estimativa (EPE); do erro médio (EM); dos coeficientes de correlação (r) e de determinação (R²) da regressão linear; do índice de concordância (d) e do índice de confiança (c), que é o produto entre r e d.

O Índice de Concordância (d) (WILLMOTT, 1981), descrito pela equação 6, varia de 0 a 1 e representa o quanto os valores de ETo, estimado pela forma padrão, se ajustam a ETPi, sendo que, valores próximos de um indicam uma concordância perfeita.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|Y_i - \bar{X}| + |X_i - \bar{X}|)^2} \right] \quad (6)$$

em que,

X_i = os valores de ETo estimados por PM;

\bar{X} = a média dos valores de ETo estimada por ETPi;

Y_i = os valores estimados por ETPi;

N = o número de dados.

O critério adotado para interpretar os valores do índice de confiança (CAMARGO & SENTELHAS, 1997) e coeficiente de correlação consta na Tabela 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Critério de interpretação do índice de confiança

Índice de confiança (c)	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,60	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Tabela 2. Critério de interpretação do coeficiente de correlação

Coefficiente de correlação (r)	Desempenho
0,9 a 1,0	Quase perfeita
0,7 a 0,9	Muito alta
0,5 a 0,7	Alta
0,3 a 0,5	Moderada
0,1 a 0,3	Baixa
0,0 a 0,1	Muito baixa

Já o erro padrão da estimativa (EPE) foi calculado utilizando-se a equação 7:

$$EPE = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{N - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Já o Erro Médio (EM) representa a diferença média de ETPi com ETo estimada por PM. Assim, o EM indica a tendência de ETPi em superestimar (EM>0) ou subestimar (EM<0) a ETo estimada por PM, sendo calculado conforme equação 8:

$$EM = \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i) \quad (8)$$

A avaliação da estimativa de ETPi diária também foi realizada dividindo as datas em grupos, de acordo com nebulosidade definida pelo Índice de Claridade (I_k), que relaciona a radiação solar global (R_g) e a radiação solar do topo da atmosfera (R_a): $0 < I_k < 0,3$ (Céu nublado); $0,3 \leq I_k < 0,65$ (Céu parcialmente nublado) e $0,65 < I_k < 1,0$ (Céu claro), seguindo a proposta de Ricieri (1998).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O coeficiente de determinação (R^2) na análise, sem distinção de nebulosidade, mostra que a ETPM explicou cerca de 59% da variação de ETPi. Com uma correlação estatisticamente significativa e considerada ‘muito alta’ ($r = 0,77$), a ETPi na escala diária apresentou um erro padrão de estimativa de 2,41mm. Apesar disto, o índice de confiança classifica as estimativas de ETPi como tendo um ‘mau’ desempenho ($c = 0,43$) no comparativo com a ETPM. Na média, a ETPi teve estimativas significativas ao nível de 1% abaixo (-2,04 mm) aos obtidos por ETPM (Tabela 3).

Numa escala temporal mais abrangente, Fernandes *et al.* (2011) mostraram que, em seis anos analisados, a ETPM anual foi superior à ETPi em quatro situações (entre 40 a 205mm ao ano) e inferior em outros dois anos (cerca de 120mm), na região de Uberaba, Minas Gerais.

Quando avaliados a ETPi de acordo com a nebulosidade, tanto o desempenho quanto a correlação diminuíram em relação à análise, sem distinção de cobertura do céu. Apesar disto, em dias de céu parcialmente nublado, a variação conjunta entre ETPM e ETPi apresentou uma ‘alta’ correlação linear ($r = 0,60$), diminuindo gradativamente para as condições de céu claro e nublado, na qual as regressões sequer foram significativas ao nível de 5%.

Os índices de confiança mostraram uma tendência mais esperada quanto a relação com a nebulosidade, aumentando gradativamente de $c=0,00$ (céu claro) até $c=0,32$ (céu nublado), isto é, quanto mais nublado, melhor o desempenho de ETPi, mesmo que este não tenha sido satisfatório em nenhuma das três condições. Esta hipótese foi concretizada devido à localização do atmômetro de Piche que isenta a evaporação medida da influência direta da radiação solar global, que seria mais semelhante à ETPM estimada em condições de céu nublado (sem a influência da radiação solar direta). Estudos como o de Lemos Filho *et al.* (2010) comprovaram a radiação solar global como o elemento meteorológico mais influente na estimativa da ETPM. Irmak *et al.* (2006) mostraram que, em geral, para diversas regiões dos Estados Unidos, a radiação solar global sobre a superfície também foi o elemento dominante na ETPM para locais úmidos no período do verão, comparado ao déficit de vapor d’água, sendo o oposto observado no período de inverno, fato atribuído, segundo os autores, à menor disponibilidade de energia no inverno e consequente aumento do déficit de vapor d’água.

Assim, estando o atmômetro de Piche isento

Tabela 3. Análises estatísticas aplicadas na avaliação da estimativa de ETPi diária (mm.dia⁻¹) para diferentes condições de nebulosidade e sem distinção

Condição de nebulosidade	R ²	r	valor-p	EPE	EM	c	d
Sem distinção	0,59	0,77	0,0000	2,41	-2,04*	0,43	0,56
Céu claro	0,17	0,41	0,3159	4,21	-3,87*	0,00	0,00
Céu parcialmente nublado	0,37	0,60	0,0000	2,45	-2,30*	0,17	0,28
Céu nublado	0,11	0,33	0,2036	0,87	-0,57*	0,32	0,97

*Diferença entre as médias de ETPM e ETPi significativas ao nível de 1% pelo teste t.

da incidência da radiação solar direta, o que passa a comandar a evaporação de forma mais intensa é a variação na capacidade do ar em reter vapor d'água, sendo a umidade relativa do ar a variável determinante. Situação semelhante teria a tendência da ETPM em condições de céu nublado. Souza *et al.* (2011), em estudo comparativo de ETPM com ETo medida por lisímetro de pesagem, especificaram que na condição de céu nublado, com baixos saldos de radiação disponíveis, o processo de ETPM se torna dependente, principalmente, da interação aerodinâmica entre planta e atmosfera, além de apresentar redução dos níveis de ETo. Contudo, com o céu nublado, o lisímetro registrou valores de ETo superiores aos estimados por ETPM. Quando a cobertura de céu diminuiu, observou-se que as correlações entre valores medidos pelo lisímetro e estimados por PM melhoraram, porém os desempenhos pioraram em razão do aumento

dos desvios.

A Figura 1 ilustra a dispersão entre os dados de ETPM e ETPi para as análises diárias com correlação estatisticamente significativas, sendo para a condição de céu parcialmente nublado (1a) e sem distinção de nebulosidade (1b). Pela análise da reta 1:1, é notável a tendência da ETPi subestimar os dados em relação à ETPM, principalmente, quanto maior for a demanda atmosférica na análise sem distinção de nebulosidade. Raciocínio semelhante à encontrada no estudo de Heldwein *et al.* (2004), que encontraram boa correlação entre a evaporação diária e, principalmente, horária, fornecida pelo atmômetro de Piche (Pi) instalado no interior de uma estufa (exposto à radiação solar direta) com a evapotranspiração máxima do pimentão (ETc). Nos dias de baixa demanda hídrica atmosférica (maior nebulosidade e temperaturas baixas), os valores de ETc e Pi praticamente se equivaleram.

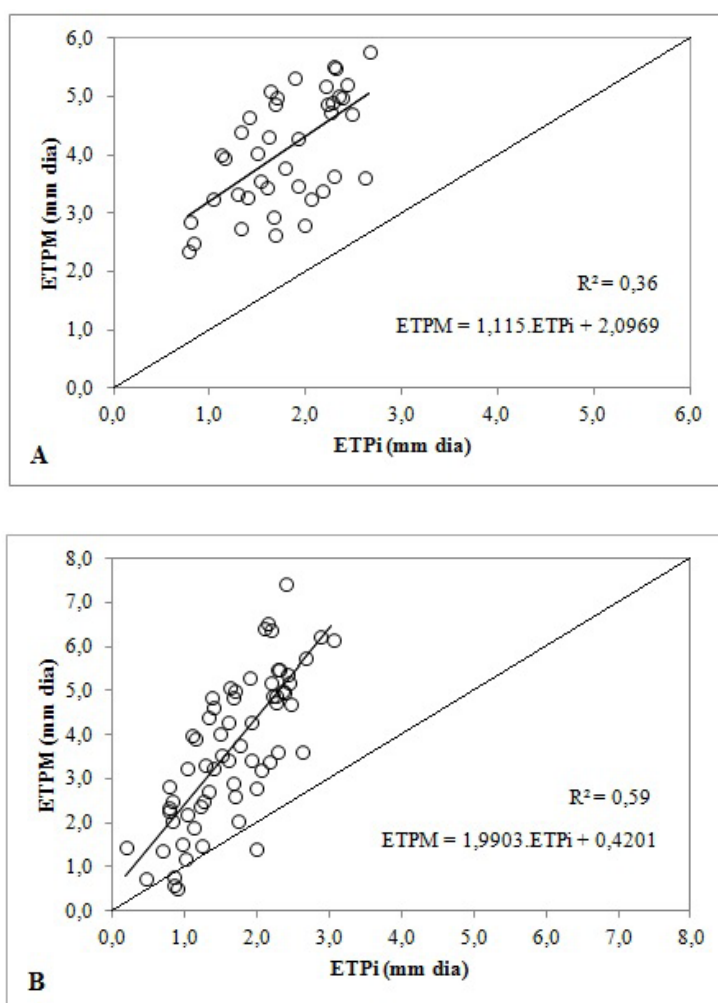


Figura 1. Relação entre a ETPM e a ETPi (mm.dia⁻¹) para dias de céu parcialmente nublado (1a) e sem distinção de nebulosidade (1b).

A variação conjunta da estimativa da ETPi com a ETPM por pântadas (sem distinção de nebulosidade) teve uma correlação ‘muito alta’, onde a ETPM explicou 69% da variação de ETPi. No entanto, o desempenho ($c = 0,32$) e a tendência de subestimativa ($EM = -2,04$ mm) pouco diferiram em relação aos melhores resultados apresentados na escala diária. Isto pode ser amenizado, ajustando as estimativas de ETPi em função da diferença média em relação à ETPM, no caso, adicionando 2,04mm. Nesta nova análise, o desempenho mais que dobrou, atingindo uma ‘boa’ classificação ($c = 0,67$) e um índice de concordância de 0,81, já que os resultados oriundos de regressão linear não se alteram (R^2 , r e valor-p), pois a sincronia entre os pares das variáveis não é alterada (Tabela 4). Porém, a melhora perceptível foi do EPE, que reduziu mais do que o quádruplo ao obtido sem a

calibração, indicando em média uma redução na variabilidade das estimativas.

O ajuste nas estimativas de ETPi pelo erro médio ou pelos coeficientes da equação de regressão é uma possibilidade de melhora nos resultados, principalmente, na escala por pântadas e provavelmente acima desta. Fernandes *et al.* (2011) encontraram altas correlações e índices de confiança entre ETPM e ETPi na escala mensal e sazonal, principalmente durante a estação chuvosa na região de Uberaba, em Minas Gerais.

A Figura 2 ilustra os coeficientes de regressão para a ETPi já ajustada em função do erro médio que, mesmo ficando nulo após o ajuste, percebe-se que a ETPi tende a superestimar (subestimar) os valores acima (abaixo) de aproximadamente 3,7mm.

Tabela 4. Análises estatísticas aplicadas na avaliação da estimativa de ETPi sem e com ajuste na escala pentadal

	R^2	r	valor-p	EPE	EM	c	d
Sem ajuste	0,69	0,83	0,0004	2,18	-2,04*	0,32	0,38
Com ajuste	0,69	0,83	0,0004	0,47	0,00	0,67	0,81

*Diferença entre as médias de ETPM e ETPi significativas ao nível de 1% pelo teste t.

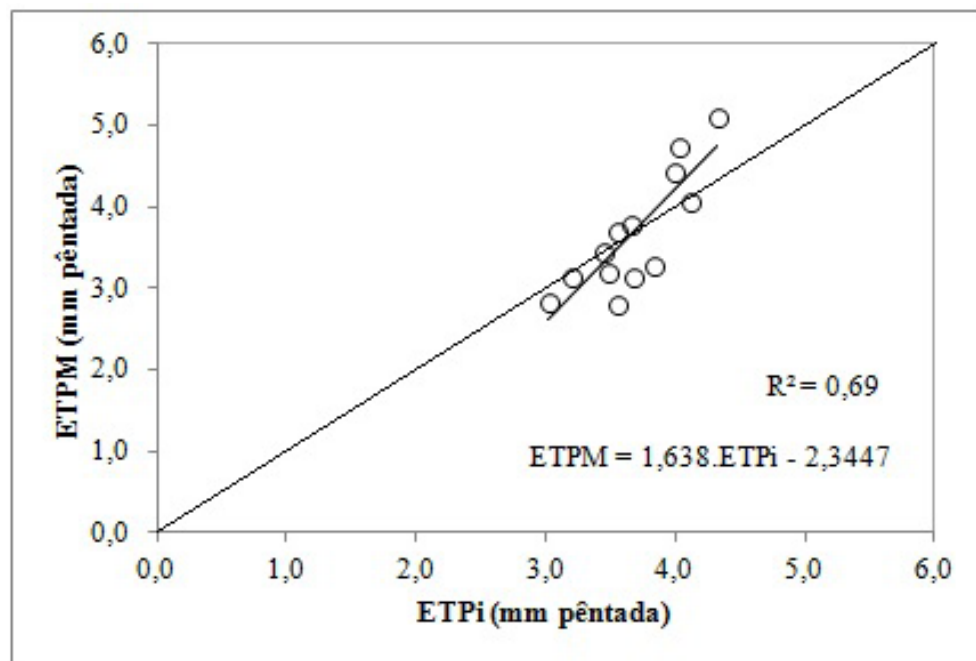


Figura 2. Relação entre a ETPM e a ETPi calibrado pelo erro médio na escala pentadal (mm.pântada^{-1}).

CONCLUSÕES

- Na escala diária, o desempenho da ETPi não foi satisfatório, independente da nebulosidade.
- O método de Penman-Piche calibrado pode ser usado para a estimativa da evapotranspiração de referência na escala pentadal.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão da bolsa de iniciação científica para a segunda autora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, P.E.P.; DURÃES, F.O.M. **Uso e manejo de irrigação**. Brasília: Embrapa, 2008. 528p.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**. Rome: FAO, 1998. 297p.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v.22, n.6, p.711-728, 2013.

ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; BASTOS, E.A.; SENTELHAS, P.C.; SILVA, A.A.G. da. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.11, n.1, p.63-68, 2003.

BRAGA, H.J.; RICCE, W. do S.; PANDOLFO, C.; GARBOSA, L.H.P.; MASSIGNAM, A.M.; BLAINSKI, E.; VIEIRA, H.J. **Agrometeorologia catarinense: estações convencionais**. Florianópolis: Epagri, 2015. 86p.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

FERNANDES, A.L.T.; FRAGA JÚNIOR, E.F.; TAKAY, B.Y. Avaliação do método de Penman-Piche para a estimativa da evapotranspiração de

referências em Uberaba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.3, p.270-276, 2011.

HELDWEIN, A.B.; STRECK, L.; SCHENEIDER, F.M.; GRIMM, E.L.; NIED, A.H.; TAZZO, I.F. Modelos para estimativa da evapotranspiração máxima da abóbora italiana em estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.12, n.1, p.75-86, 2004.

IRMAK, S.; PAYERO, J.O.; MARTIN, D.L.; IRMAK, A.; HOWELL, T. Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v.132, n.6, p.564-578, 2006.

LEMONS FILHO, L.C.A.; CARVALHO, L.G.; EVANGELISTA, A.W.P.; ALVES JÚNIOR, J. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.2, p.1294-1303, 2010.

MENDONÇA, E.A.; DANTAS, R.T. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.2, p.196-202, 2008.

PEREIRA, A.R.; SEDIYAMA, G.C.; VILLA NOVA, N.A. **Evapotranspiração**. Campinas: Fundag, 2013. 323p.

RICIERI, R.P. **Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa**. 1998. 81f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 1998.

SOUZA, A.P.; CARVALHO, D.F.; SILVA, L.B.D.; ALMEIDA, F.T.; ROCHA, H.S. Estimativa da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.46, n.3, p.219-228, 2011.

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