

AJUSTE DAS EQUAÇÕES DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA TORRES-RS

Gabriel Franke Brixner¹
Jocélia Rosa da Silva²
Arno Bernado Heldwein³
Mateus Leonardi⁴
Andressa Janaína Puhl⁵
Daniella Moreira Salvadé⁶

RESUMO: O conhecimento do valor da evapotranspiração das plantas determina a quantidade de água que necessita ser reposta à cultura de maneira que não haja desperdício e atenuação da produtividade. Os valores da evapotranspiração de referência (ET_o) são muito variáveis em função dos vários métodos de estimativa utilizados e também pela variabilidade climática de cada região. A escolha de um método para essa estimativa depende fundamentalmente das variáveis meteorológicas disponíveis e da precisão da estimativa. Os métodos recomendados como padrão são os de Penman e o de Penman-Monteith, porém sua utilização torna-se restrita em alguns casos. Como alternativa é recomendado o emprego de métodos mais simples aos métodos padrão. O objetivo deste trabalho é comparar os modelos de estimativa da evapotranspiração de referência de Benavides-Lopez, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Heise, Makkink, Priestley-Taylor, Tanner-Pelton e Turc, com o método de estimativa de Penman-Monteith e proceder o ajuste dos coeficientes dos modelos para melhorar a estimativa da ET_o para o município de Torres do estado do Rio Grande do Sul. Foram utilizados dados meteorológicos diários das Estações Meteorológicas Automática e Convencional do município de Torres, do período de junho de 2006 a junho de 2013 para estimar e ajustar os coeficientes dos métodos. Após o cálculo da estimativa diária da evapotranspiração de referência para cada método, foi feita a comparação para a avaliação do desempenho dos ajustes, por meio do coeficiente de determinação (R²) e a raiz do quadrado médio do erro (RQME). Todos os modelos tiveram ajuste nos seus coeficientes, no qual o ajuste resultou em melhorias em pelo menos um dos índices estatísticos analisado. O método em que se obteve ajuste de maneira precisa e exata foi o de Tanner-Pelton.

Palavras-chave: Penman-Monteith, irrigação, variáveis meteorológicas.

-
- 1 Engenheiro Agrônomo, Prof. Dr., Colégio Agrícola Municipal Dr. Luiz Martins Bastos, e-mail: brixner_gfb@yahoo.com.br.
 - 2 Engenheira Agrônoma, Doutoranda PPGAgronomia, Universidade Federal de Santa Maria.
 - 3 Engenheiro Agrônomo, Prof. Dr., Universidade Federal de Santa Maria.
 - 4 Engenheira Agrônoma, Mestrando PPGAgronomia, Universidade Federal de Santa Maria.
 - 5 Engenheira Agrônoma, Mestrando PPGAgronomia, Universidade Federal de Santa Maria.
 - 6 Acadêmica do Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria.

ADJUSTMENT OF THE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION EQUATIONS FOR TORRES-RS

ABSTRACT: The knowledge of the value of evapotranspiration of plants determines the amount of water that needs to be returned to the crop in a way that does not waste and attenuation of productivity. The reference evapotranspiration values are very variable depending on the various estimation methods used and on the climatic variability of each region. The choice of a method for this estimate depends fundamentally on the available meteorological variables and the accuracy of the estimate. The recommended methods are Penman and Penman-Monteith, but their use becomes restricted in some cases. Alternatively, it is recommended to use simpler methods to standard methods. The objective of this work is to compare the models of estimation of the reference evapotranspiration of Benavides-Lopez, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Heise, Makkink, Priestley-Taylor, Tanner-Pelton and Turc, using Penman-Monteith estimation method and to adjust the coefficients of the models to improve the ETo estimation for the municipality of Torres in the state of Rio Grande do Sul. Daily meteorological data of the Automatic and Conventional Meteorological Stations of the municipality of Torres were used from June 2006 to June 2013 to estimate and adjust the coefficients of the methods. After calculating the daily estimate of the evapotranspiration reference for each method, the comparison was made for the evaluation of the performance of the adjustments, by means of the coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RQME). All models had their coefficients adjusted, in which the adjustment resulted in improvements in at least one of the statistical indices analyzed. The method in which an exact and accurate adjustment was obtained was that of Tanner-Pelton.

Keywords: Penman-Monteith, irrigation, meteorological variables.

INTRODUÇÃO

A evaporação da água do solo juntamente com a transpiração das plantas, somam perdas de água do sistema solo-planta para a atmosfera (SEDIYAMA et al., 1996; PEREIRA et al., 1997). A evaporação da superfície do solo é dependente principalmente da radiação solar, além de fatores ligados consequentemente a ela como a temperatura do ar e solo, e o déficit de saturação de vapor do ar, além do vento que é um condicionante que renova o ar junto à superfície do solo. A transpiração das plantas é um processo biofísico em que ocorre a perda de água pelos tecidos das plantas para a atmosfera.

A crescente demanda por alimentos impõe aos sistemas agrícolas o uso racional dos fatores de produção, entre eles otimização da água, visto que em excesso ou déficit contribui para queda nos rendimentos dos cultivos, chegando, inclusive, a torná-los economicamente inviáveis (VALNIR JUNIOR et al., 2017). Como solução para manter a produtividade agrícolas surge a irrigação (SILVA et al., 2008; PAZ et al.

2000), mas o manejo da irrigação passa fundamentalmente pela determinação da evapotranspiração (PILAU et al., 2012).

A evapotranspiração de referência (ET_o) pode ser obtida por métodos diretos e indiretos, no qual o mais usual são os indiretos por serem menos onerosos e baseiam-se na aplicação de métodos matemáticos que utilizam dados meteorológicos (PEREIRA et al., 1997; HALLAL et al., 2014). O método proposto por Penman-Monteith (ALLEN et al., 2006) é utilizada como padrão de comparação com os outros métodos por ser o mais preciso para estimar a ET_o.

A utilização do método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 2006) requer uma grande necessidade de variáveis meteorológicas para sua determinação. No Brasil o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibiliza dados meteorológicos horários das suas estações meteorológicas automáticas, que estão localizadas em todos os estados brasileiros. Tais variáveis disponibilizados possibilita a estimativa do método de Penman-Monteith, porém caso alguma variável não esteja sendo registrada pela estação meteorológica torna-se impossível a estimativa pelo método. Assim, é recomendável a utilização de métodos que requerem menos variáveis meteorológicas para estimativa da ET_o.

Muitos dos métodos alternativos utilizados para estimar a evapotranspiração são aprimorados de outras anteriormente conhecidas, aprimoradas com a finalidade de apresentar melhor ajuste a determinadas localizações geográficas em estudo (HALLAL et al., 2014). Atualmente existem trabalhos que fizeram ajuste de métodos para o estado do Rio Grande do Sul (HALLAL et al., 2014; ROSA, 2016), porém nenhum deles abrangendo as características climáticas do município de Torres.

Este trabalho tem como objetivo comparar os modelos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) de Benavides-Lopez (BL), Camargo (CM), Hargreaves-Samani (HS), Jensen-Heise (JH), Makkink (MA), Priestley-Taylor (PT), Tanner-Pelton (TP) e Turc (TU), com o método de estimativa de Penman-Monteith e proceder o ajuste dos coeficientes dos modelos para melhorar a estimativa da ET_o para o município de Torres do estado do Rio Grande do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados meteorológicos diários foram obtidos das Estações Meteorológicas Automática (EMA) e Convencional (EMC) do município de Torres, localizado no estado do Rio Grande do Sul. A EMA e a EMC de Torres estão localizadas a uma latitude de -29.350359° , longitude de -49.733056° , a uma altitude de 8 metros do nível do mar.

Para a realização deste trabalho foram empregados dados meteorológicos do período de junho de 2006 a junho de 2013. No qual, para o período de 2006 a 2009 os dados foram utilizados para realizar a calibração dos coeficientes das equações de evapotranspiração referência, enquanto para o período de 2010 e 2013 os dados foram utilizados para a validação dos métodos. Em alguns dias, devido a problemas diversos (problemas de leituras, inconsistência de dados erro operacional, entre outros) não havendo disponibilidade de todas as medições das variáveis meteorológicas, optando pelo descarte dos mesmos, para melhor comparação entre os métodos.

Os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência usados para a realização dos ajustes dos coeficientes foram o de Benavides-Lopez (BL), Camargo (CM), Hargreaves-Samani (HS), Jensen-Haise (JH), Priestley-Taylor (PT), Tanner-Pelton (TP), e Turc (TU), apresentados na Tabela 1. Os métodos variam quanto ao número de parâmetros meteorológicos exigidos para a realização do cálculo e todos eles foram comparados ao método de Penman-Monteith (PM).

Para a estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith utilizou-se a equação parametrizada, bem como os demais procedimentos descritos por Allen et al. (2006). A estimativa de ETo para cada método foi realizada diariamente, conforme disponibilidade de dados e período analisado (calibração e validação), com posterior somatório mensal de cada método, visando avaliar o comportamento da ETo ao longo do ano.

Para a calibração dos coeficientes dos métodos avaliados, procedeu-se inicialmente a comparação entre os valores calculados da ETo pelo método de PM com os provenientes da estimativa pelos demais métodos. Posteriormente, a partir da análise dos desvios, procedeu-se o ajuste local dos respectivos coeficientes, adequando-os às condições do município de Torres, utilizando-se o assistente de regressão não linear do programa estatístico SigmaPlot. Definido os novos coeficientes, procedeu-se a validação dos ajustes dos coeficientes dos métodos analisados.

Tabela 1. Métodos de estimativa de evapotranspiração de referência avaliados Penman-Monteith (PM), Benavides-Lopez (BL), Camargo (CM), Hargreaves-Samani (HS), Jensen-Haise (JH), Priestley-Taylor (PT), Tanner-Pelton (TP), Turc (TU) e suas respectivas equações.

Table 1. Methods of estimating reference evapotranspiration evaluated Penman-Monteith (PM), Benavides-Lopez (BL), Camargo (CM), Hargreaves-Samani (HS), Jensen-Haise (JH), Priestley-Taylor (PT), Tanner-Pelton (TP), Turc (TU) and their respective equations.

Métodos Utilizados	Referência original	Equações de estimativa da ETo*
Penman-Monteith (PM)	Allen et al. (2006)	$ETo = \frac{\Delta Q^*}{(\Delta + \gamma^*)L} + \frac{900 \gamma u_2 d}{(\Delta + \gamma^*)(T_{méd} + 273)}$
Benavides-Lopez (BL)	Benavides e Lopez (1970)	$ETo = a 10^{\left[\frac{7.5 T_{méd}}{1237.5 + T_{méd}}\right]} (1 - 0.01UR) + b T_{méd} + c$
Camargo (CM)	Camargo (1971)	$ETo = 0.01 \left(\frac{K_0 \downarrow}{2.45}\right) T_{méd}$
Hargreaves-Samani (HS)	Hargreaves e Samani (1982)	$ETo = a K_0 \downarrow [(T_{máx} - T_{mín})0.5] (T_{méd} + b)$
Jensen-Haise	Jensen e Haise (1963)	$ETo = \frac{k \downarrow}{2.45} (a T_{méd} + b)$
Makkink (MK)	Makkink (1957)	$ETo = a \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{K \downarrow}{2.45} - b$
Priestley-Taylor (PT)	Priestley & Taylor (1972)	$ETo = a \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{Q^*}{2.45}$
Tanner-Pelton (TP)	Tanner & Pelton (1960)	$ETo = a \frac{Q^*}{2.45} - b$
Turc (TU)	Turc (1955)	$ETo = a \left[\frac{T_{máx}}{(T_{máx} + b)} (c + K \downarrow 23.88) \right]$

ETo: evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); Δ é a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água (kPa °C⁻¹); Q é o saldo de radiação (MJ m⁻² d⁻¹); γ* é a constante psicrométrica ajustada em função da parametrização das resistências aerodinâmica e da cultura = 0,0662(1+0,33.u2); L é o calor latente de evaporação (2,46 MJ kg⁻¹); γ é a constante psicrométrica (0,0662 kPa °C⁻¹); u₂ é a velocidade média diária do vento a 2 m de altura (m s⁻¹); d é o déficit de saturação de vapor do ar (kPa); T_{méd} é a temperatura média diária (°C); UR é a umidade relativa do ar (%); K₀↓ é a radiação solar na ausência de atmosfera (MJ m⁻² d⁻¹); T_{máx} é a temperatura máxima diária (°C); T_{mín} é a temperatura mínima diária (°C) e K↓ é a radiação solar global incidente (MJ m⁻² d⁻¹).

Para a avaliação do desempenho dos ajustes foram analisados, somente na escala diária, o coeficiente de determinação (R²) e a raiz do quadrado médio do erro (RQME). A acurácia das comparações entre os métodos testados e ajustados com o de PM também foi analisada usando como parâmetros, os termos da equação da reta descrita pela equação y = ax + b, em que o termo 'a' é o coeficiente angular e o termo 'b' é o coeficiente linear. O modelo melhor ajustado é aquele que coincide o coeficiente angular igual ou o mais próximo a um e o linear igual ou o mais próximo de zero.

RESULTADOS

Os métodos de estimativa de evapotranspiração de referência avaliados e seus respectivos coeficientes originais e ajustados para Torres-RS, são apresentados na Tabela 2. Verifica-se que todos os modelos tiveram ajuste nos seus coeficientes.

Tabela 2. Métodos de estimativa de evapotranspiração de referência avaliados, Benavides-Lopez (BL), Camargo (CM), Hargreaves-Samani (HS), Jensen-Haise (JH), Priestley-Taylor (PT), Tanner-Pelton (TP), Turc (TU), e seus respectivos coeficientes originais e ajustados para Torres, RS.

Table 2. Estimated reference evapotranspiration estimation methods, Benavides-Lopez (BL), Camargo (CM), Hargreaves-Samani (HS), Jensen-Haise (JH), Priestley-Taylor (PT), Tanner-Pelton (TP), Turc (TU), and their respective original coefficients and adjusted for Torres, RS.

Método analisado ¹	Coeficientes originais			Coeficientes ajustados Torres ²		
	a	b	c	a ajust.	b ajust.	c ajust.
BL	1,21	0,21	2,3	1,262	0,286	3,0962
CM	0,01	—	—	0,0129	—	—
HS	0,0023	17,8	—	0,0052	—	—
JH	0,0252	0,078	—	0,0238	0,0242	—
MK	0,61	0,12	—	0,802459	0,313051	—
PT	1,26	—	—	1,3632	—	—
TP	1,12	0,11	—	0,9697	0,076	—
TU	0,013	15	50	0,0572	128,6049	-10,2992

¹BL = Benavides-Lopes; CM = Camargo; HS= Hargrevis-Samani; JH = Jensen-Haise; MK = Makkink. PT = Priestley-Taylor; TP = Tanner-Pelton e TU = Turc.

²Coeficientes calibrados (a, b, c) para as condições de Torres, RS.

Na comparação dos valores diários da evapotranspiração de referência estimada pelo método de PM com os demais métodos de estimativa da ETo com coeficientes ajustados para o município de Torres, observa-se que o desempenho foi bastante variável (Figuras 1 e 2), porém todos os métodos apresentaram melhorias com coeficientes ajustados em pelo menos um dos índices estatísticos resultantes da análise. O método em que se obteve ajuste de maneira precisa e exata, foi o de TP, em que sua linha de tendência praticamente se sobrepõe à linha 1:1 (Figura 2f).

Os métodos de BL, CM e HS (Figuras 1a, 1b, 1c, 1d, 1e e 1f) apresentaram melhorias quando ajustados os coeficientes da equação, diminuindo o RQME, porém em comparação aos demais métodos os seus desempenhos não foram satisfatórios, apresentando RQME acima de 1,00 mm dia⁻¹ mesmo com o ajuste dos coeficientes, com tendência de subestimativa da ETo quando comparado ao método de PM.

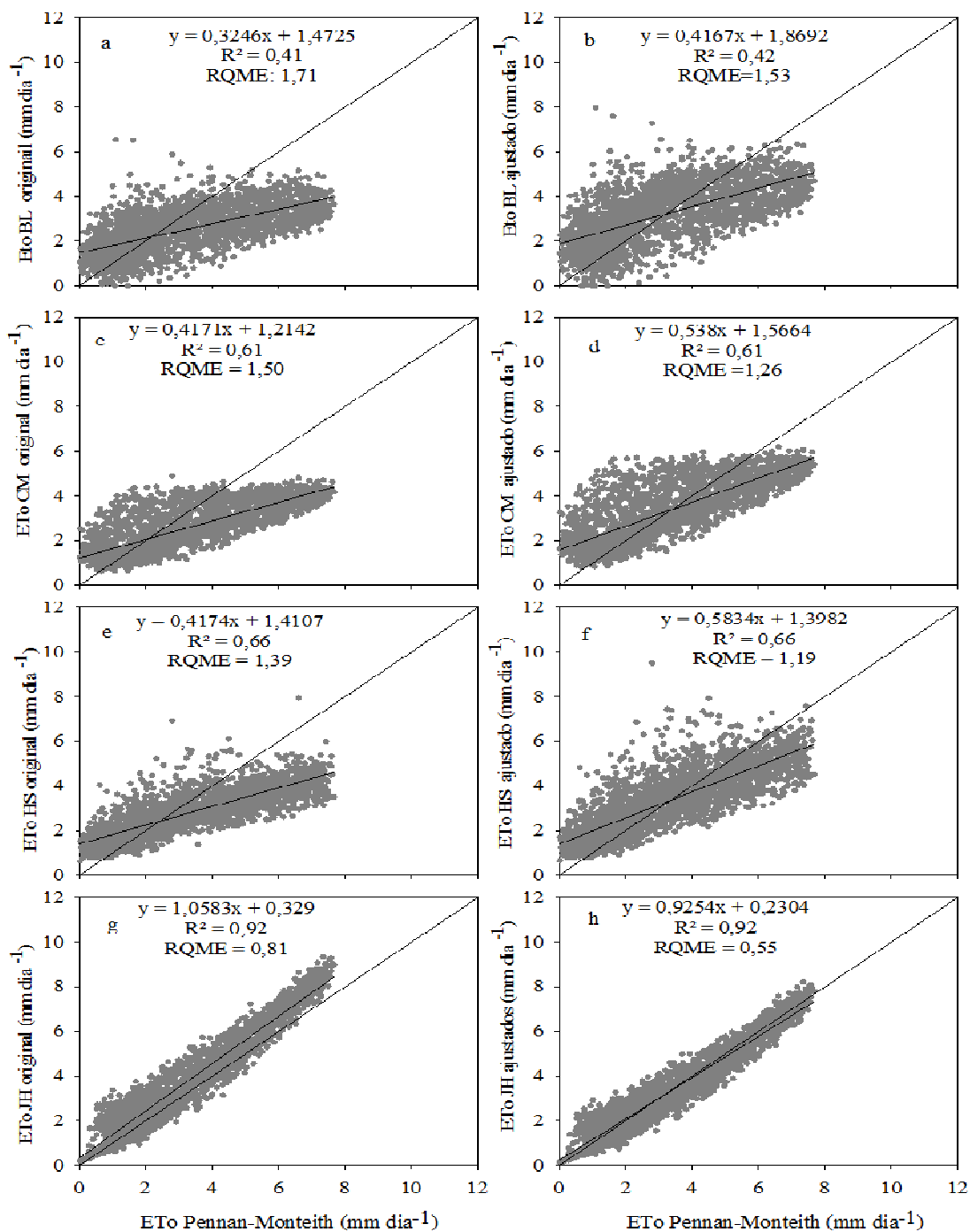


Figura 1. Evapotranspiração de referência diária (ETo, mm dia⁻¹) estimada pelo método de Penman-Monteith em relação aos métodos de ETo de Benavides-Lopez (BL) com os coeficientes originais¹ (a) e ajustados² (b), de ETo de Camargo (CM) com os coeficientes originais¹ (c) e ajustados² (d), ETo de Hargreaves-Samani (HS) com os coeficientes originais¹ (e) e ajustados² (f), de ETo de Jensen-Haise (JH) com os coeficientes originais¹ (g) e ajustados² (h), com seus respectivos coeficiente de determinação (R²) e raiz do quadrada média do erro (RQME, mm dia⁻¹) para o município de Torres, RS.

Figure 1. Daily reference evapotranspiration (ETo, mm dia⁻¹) estimated by the Penman-Monteith method in relation to the Benavides-Lopez (BL) ETo methods with the original coefficients¹ (a) and adjusted coefficients² (b) of ETo (C) and adjusted coefficients (d), Hargreaves-Samani ETo (HS) with the original coefficients¹ (e) and adjusted² (f), from Jensen-Haise ETo with the with the respective coefficient of determination (R²) and mean square root of the error (RQME, mm dia⁻¹) for the municipality of Torres, RS.

¹Período de abrangência dos dados meteorológicos de 2007 a 2013, conforme disponibilidade dos dados.

²Período de abrangência dos dados meteorológicos de 2014 a 2015, conforme disponibilidade dos dados.

O método de MK apesar de ter em sua equação a variável radiação solar global incidente não apresentou um ótimo desempenho, tendendo a subestimar a ETo

quando acompanhada dos coeficientes originais (Figura 2a). Com o ajuste dos coeficientes do método (Figura 2b), obteve-se uma diminuição significativa no valor do RQME, diminuindo assim o erro da estimativa da evapotranspiração de referência em comparação ao método de PM.

O método de PT também apresentou melhor estimativa de E_{To} quando o coeficiente da equação foi ajustado (Figuras 2c e 2d) apresentando alta correlação com o método de PM. Sem o ajuste o método tende a subestimar a E_{To} , porém mesmo com o coeficiente original o método apresenta ótimo desempenho. Considerando que o método de PT também tem como dados de entrada o saldo de radiação verifica-se que com ajuste dos coeficientes a e b, resultou em excelente desempenho para a estimativa de E_{To} , podendo ser uma boa alternativa para a estimativa de E_{To} na ausência de dados de velocidade do vento.

O método de TP foi a que apresentou de maneira geral o melhor desempenho (menor RQME, maior R^2 , coeficiente linear e angular próximo a zero e um, respectivamente) com os coeficientes ajustados (Figura 2f). Com os coeficientes originais, tende a superestimar os valores de E_{To} de forma crescente para Torres (Figuras 2e). Fazendo uso dos coeficientes ajustados, o RQME obtido foi de apenas $0,13 \text{ mm dia}^{-1}$, inferindo-se que esse método é a melhor alternativa ao método de PM quando não há disponibilidade de dados de velocidade do vento.

O ajuste dos coeficientes a, b e c (Tabela 2) da equação trouxe melhorias consideráveis ao método de TU para Torres (Figuras 2g e 2h). O teste do modelo apresentou RQME menor para equação ajustada e maior para a equação com os coeficientes originais.

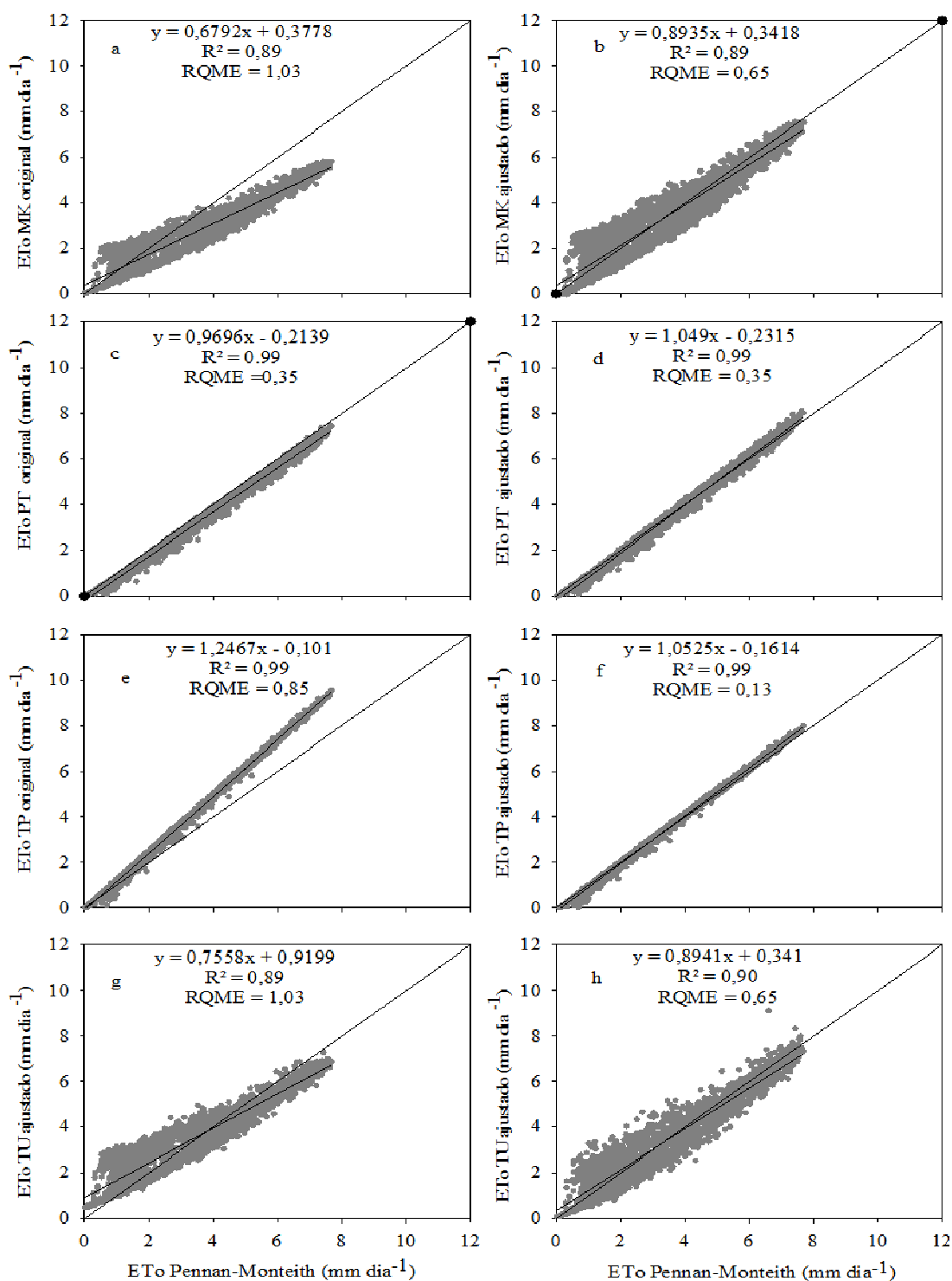


Figura 2. Evapotranspiração de referência diária (ETo, mm dia⁻¹) estimada pelo método de Penman-Monteith em relação aos métodos de ETo de Makkink (MK) com os coeficientes originais¹ (a), e ajustados² (b), de ETo de PT com os coeficientes originais¹ (c), e ajustados² (d), ETo de Tanner-Pelton (TP) com os coeficientes originais¹ (e), e ajustados² (f), ETo de Turc (TU) com os coeficientes originais¹ (g) e ajustados² (h), com seus respectivos coeficiente de determinação (R²) e raiz quadrada média do erro (RQME, mm dia⁻¹) para o município de Torres, RS.

Figure 2. Daily reference evapotranspiration (ETo, mm dia⁻¹) estimated by the Penman-Monteith method in relation to the Makkink ETo methods with the original coefficients¹ (a), and adjusted² (b), ETo of (T) with the original coefficients (g), with the original coefficients (c), and adjusted (d), the Tanner-Pelton ETo with the original coefficients (e) and adjusted² (h), with their respective coefficient of determination (R²) and mean square error root (RQME, mm dia⁻¹) for the municipality of Torres, RS.

¹Período de abrangência dos dados meteorológicos de 2006 a 2009, conforme disponibilidade dos dados.

²Período de abrangência dos dados meteorológicos de 2010 a 2013, conforme disponibilidade dos dados.

As variações mensais entre as estimativas de evapotranspiração de referência pelos métodos de ETo de BL, CM, HS, JH, MK, PT, TP e TU sem e com ajuste dos coeficientes para Torres, são apresentadas na Figura 3.

Em escala mensal os métodos de BL, CM, HS e MK com os coeficientes originais tendem a subestimar a estimativa da ETo (Figuras 3a, 3b, 3c e 3e), principalmente nos meses de verão. Com o ajuste dos coeficientes os métodos de CM, HS e MK mostraram grande melhoria, com tendência a sobreposição ao estimado pelo método de PM. Nos meses de verão a subestimação da ETo pelo método de BL pode ser superior a 80 mm mês^{-1} e em alguns meses do inverno superior a 32 mm mês^{-1} . Com o ajuste dos coeficientes da equação de BL, os valores das superestimações passam a ser de 50 mm mês^{-1} nos meses de verão e de no máximo 27 mm mês^{-1} nos meses de inverno (Figura 6a). Por ser um método que gera altos erros não só sistemáticos na estimativa de ETo, ele deve ser evitado, mesmo com o devido ajuste às condições meteorológicas da cidade de Torres, RS.

O método da ETo de JH com os coeficientes originais tende a superestimar os valores da estimativa de ETo no primeiro semestre do ano, já no segundo semestre a estimativa mensal está muito perto da estimada pelo método de PM (Figura 3d). Com o ajuste dos coeficientes da equação houve uma mudança de comportamento da estimativa com tendência de aproximação aos valores de PM no primeiro semestre e uma subestimativa no segundo semestre, deste modo recomenda-se o uso do método de JH com os coeficientes ajustados no primeiro semestre do ano e com os coeficientes originais para a estimativa de ETo no segundo semestre do ano.

Ao comparar a estimativa de ETo de PT (Figura 3f), em escala mensal, com o modelo de estimativa de ETo de PM, o modelo subestima os valores de ETo de maneira uniforme ao longo do ano com coeficientes ajustados e originais, com exceção dos meses de janeiro a março. Porém, destaca-se que com a utilização dos coeficientes ajustados os valores estimados apresentam-se mais próximos aos do método de PM e com um desvio sistemático.

O método de TP apresentou grande aproximação ao método de PM quando os coeficientes foram ajustados (Figura 3g), sem o ajuste nos coeficientes o método tende a superestimar os valores de ETo ao longo de todos os meses do ano, mas em maior proporção nos meses de verão. Nesses meses a correta estimativa de ETo é fundamental para a estimativa da evapotranspiração máxima, pois as chances de ocorrência de períodos com déficit hídrico no solo é maior.

O ajuste dos coeficientes da equação de TU também melhora seu desempenho, porém subestima a ETo nos meses de verão e a superestima nos meses de inverno (Figura 3h). Nos meses de verão a subestimativa do método com coeficientes ajustados pode chegar a 17 mm mês⁻¹, sem o ajuste é de 23 mm mês⁻¹.

Para a determinação da estimativa de ETo ao longo do ano os métodos de CM, JH, PT e TP devem ser utilizados preferencialmente com os coeficientes ajustados. O métodos de BL com os coeficientes originais apresentaram grande subestimativa da ETo, principalmente nos meses de verão para o município de Torres, devendo ser preterido.

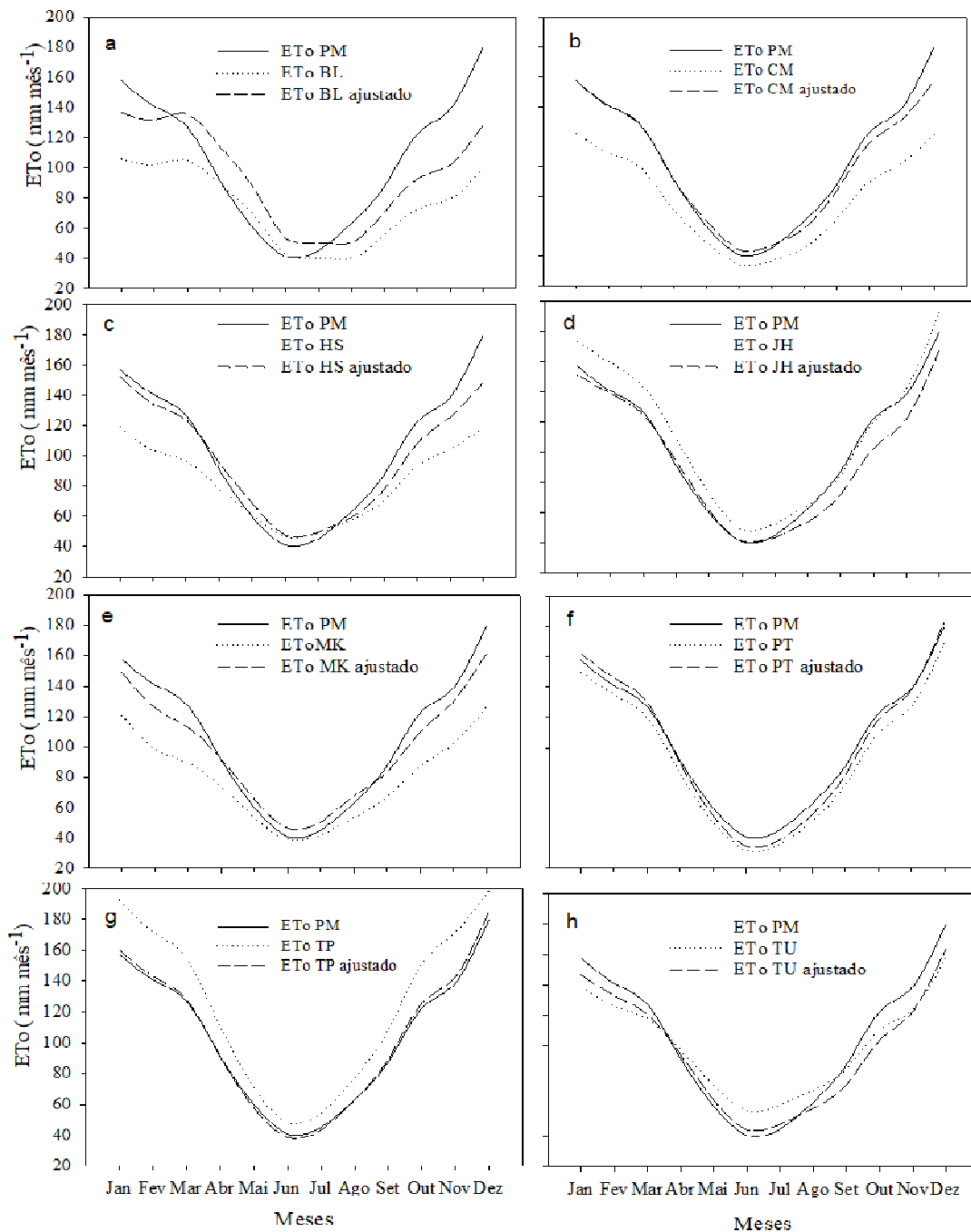


Figura 3. Somatório da estimativa média mensal de evapotranspiração de referência (ET_o , mm mês^{-1}) para os métodos de Penman-Monteith (PM), Benavides-Lopez¹ e Benavides-Lopez com coeficientes ajustados² (a), PM, Camargo¹ e Camargo com coeficientes ajustados² (b), PM, Hargreaves-Samani¹ e Hargreaves-Samani com coeficientes ajustados² (c), PM, Jensen-Haise¹ e Jensen-Haise o com coeficientes ajustados² (d), PM, Makkink¹ e Makkink com coeficientes ajustados² (e), PM, Priestley-Taylor¹, e Priestley-Taylor com coeficientes ajustados² (f), PM, Tanner-Pelton¹, e Tanner-Pelton com coeficientes ajustados² (g) e PM, Turc¹, e Turc com coeficientes ajustados² (g), para Torres, RS.

Figure 3. Somatory of the monthly mean estimate of reference evapotranspiration (ET_o , mm^{-1}) for the Penman-Monteith (PM), Benavides-Lopez¹ and Benavides-Lopez methods with adjusted coefficients² (a), PM, Camargo¹ and Camargo (d), PM, Makkink¹ and Makkink with adjusted coefficients² (b), PM, Hargreaves-Samani¹ and Hargreaves-Samani with adjusted coefficients² (c), PM, Jensen-Haise¹ and Jensen-Haise o with adjusted coefficients²), PM, Priestley-Taylor¹, and Priestley-Taylor with adjusted coefficients² (f), PM, Tanner-Pelton¹, and Tanner-Pelton with adjusted coefficients² (g) and PM, Turc¹, and Turc with adjusted coefficients² (g), for Torres, RS.

DISCUSSÃO

Na literatura científica é possível encontrar apenas um trabalho que determinou o ajuste de coeficiente de métodos alternativos para estimar a evapotranspiração do estado do Rio Grande do Sul, sendo este trabalho desenvolvido para a para os município de Pelotas (HALLAL et al., 2014). Este trabalho ajustou os coeficientes do método JH e constatou que o método com os coeficientes ajustado torna-se uma boa alternativa para estimar a evapotranspiração de referência para Pelotas, RS, quando os valores são inferiores a 8 mm d^{-1} , bem como o método apresenta distinto desempenho conforme estação do ano. No atual trabalho o método de JH com os coeficientes originais e ajustados (Figura 1g e 1h) o R^2 não apresentou mudança expressiva, porém essa diferença foi mais expressiva no RQME, diminuindo o mesmo significativamente.

A Figura 1, 2 e 3 demonstram que o método ajustado que apresenta melhor estimativa em relação ao método padrão é o método TP. Para o Brasil foi encontrado apenas um trabalho em que ajustou o coeficiente deste método, desenvolvido por Saler et al. (2018) para o município de São Mateus, Espírito Santos. O Método de TP apresentou o mesmo padrão observado no presente trabalho, sendo considerado por Saler et al. (2018) um método altamente robustos.

CONCLUSÕES

O ajuste dos coeficientes das equações de estimativa da evapotranspiração de referência dos métodos de Benavides-Lopez, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Priestley-Taylor, Tanner-Pelton e Turc, permite obter uma melhor precisão na estimativa da ETo do que com os coeficientes originais, para o município de Torres, Rio Grande do Sul.

Os métodos de Benavides-Lopez e Camargo, apesar de apresentarem melhorias com o ajuste dos coeficientes da equação dos métodos, devem ser evitados para a estimativa de ETo, para o município de Torres, Rio Grande do Sul. O método de Camargo sempre faz uma subestimativa durante todo ano e o de Benavides-Lopez é praticamente todo o ano.

O modelo de Tanner-Pelton, com coeficientes ajustados para o município de Torres, Rio Grande do Sul, é o mais adequado para estimar ETo quando há limitação de disponibilidade de dados de velocidade do vento e umidade do ar.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O.; WRIGHT, J. L.; HOWELL, T. A.; VENTURA, F.; SNYDER, R.; ITENFISU, D.; STEDUTO, P.; BERENGENA, J.; BASELGA, Y.J.; SMITH, M.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; PERRIER, A.; ALVES, I.; WALTER, I.; ELLIOTT, R. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by FAO56 Penman–Monteith method. *Agriculture Water Manage*, p. 1–22, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>

BENAVIDES G.; LOPEZ DIAZ, J. Fórmula para calcular a evapotranspiração potencial adaptada aos trópicos (15 ° N _ 15 ° S). *Tropical Agronomía*, v.20, n.5, p.335-345, 1970.

CAMARGO, A. P. Balanço hídrico no estado de São Paulo. 3.ed. Campinas: IAC, 1971. 24 p. Boletim n.116.

HALLAL, M. O. C.; SCHOFFEL, R. E.; BRIXNER, G. F.; RADUNZ, A. L. Ajuste de uma Equação de Estimativa da Evapotranspiração de Referência para Pelotas – RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.19, n.2, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n2.p147-156>

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimation of potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage*, v.108, n.3, p. 225-230, 1982.

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

MAKKINK, G, F. Ekzamento de la formulo de Penman. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. v.5, p. 290-305, 1957.

PAZ, V. P. S.; TEODORO R. E. F; MENDONÇA, F. C. Water Resources, Irrigated Agriculture and Environment. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.4, p.465-473, 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662000000300025>

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

PILAU, F. G.; BATTISTI, R.; SOMAVILLA, L.; RIGHI, E. Z. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nas localidades de Frederico

Westphalen e Palmeira das Missões, RS. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.42, n.2, p.283-290, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782012000200016>

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, v.100, n.2, p. 81-92, 1972.

SALES, R. A.; OLIVEIRA, E. C.; LIMA, M. J. A.; GELCER, E. M.; SANTOS, R. A.; LIMA, C. F. Ajuste dos coeficientes das equações de estimativa da evapotranspiração de referência para São Mateus, ES. *Irriga*, Botucatu, v.23, n.1, p. 154-167, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2018v23n1p154>

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

SILVA, C. A.; TEODORO, R. E. F.; MELO, B. Productivity and yield of coffee plant under irrigation levels. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, p.387-394, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2008000300014>

TANNER, C. B.; PELTON, W. L. Potential evapotranspiration estimates by approximate energy balance method of Penman. *Journal of Geophysical Research*, v.65, n.10, p. 3391-3413, 1960. <https://doi.org/10.1029/JZ065i010p03391>

TURC, L. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Annals of Agronomy*, v.12, n.1, p. 13-49, 1961.

VALNIR JUNIOR, M.; RIBEIRO, F. C.; ROCHA, J. P. A.; LIMA, S. C. R. V.; CARVALHO, C. M.; GOMES FILHO, R. R. Desenvolvimento de um software para o manejo da microirrigação. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.11, n.2, p. 1324-1330, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v11n200616>