



MÉTODOS ALTERNATIVOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (E_{T0}) COMPARADOS AO MÉTODO PADRÃO DE PENMAN-MONTEITH FAO 56 PARA ARAPIRACA-AL

S. M. de Menezes¹, F. H. N de Andrade², A. C. R. A. da Silva³, A. T. C. S. G. da Silva⁴,
D. F. Lima⁵, V. S. Barros⁶

RESUMO: O manejo de irrigação visa suprir à quantidade de água ideal para as culturas, com o propósito de racionalizar o uso dos recursos hídricos disponíveis e reduzir gastos desnecessários com insumos e energia. A determinação da evapotranspiração de referência (E_{T0}) tem relação direta com o manejo da água na agricultura, e caracteriza-se por ser uma ferramenta importante na estimativa da necessidade hídrica das plantas e no dimensionamento de sistemas de irrigação. Avaliar a adequação de métodos alternativos na estimativa da E_{T0} em comparação com o padrão de Penman-Montheith FAO 56, possibilita a utilização dos mesmos em regiões cujas informações sobre as variáveis climatológicas são incipientes ou onde há deficiência no monitoramento dos elementos meteorológicos, tornando limitante a aplicação do modelo padrão. Objetivou-se comparar os métodos alternativos de estimativa de E_{T0} , Makkink (MAK), Hargreaves-Samani (H-S), Jensen-Haise (J-H), Priestley-Taylor (P-T) e FAO-Radiação (FAO-Rad), com o método de Penman-Montheith FAO 56, durante o período de um ano. Os dados climatológicos foram adquiridos diariamente em uma estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na cidade de Arapiraca, situada no Agreste de Alagoas, no período de janeiro a dezembro de 2015. A avaliação dos métodos foi realizada por meio dos valores dos coeficientes de determinação (R^2) e de correlação (r), Erro Padrão da Estimativa (EPE) e os índices de concordância (d) e desempenho (c). Os métodos FAO-Radiação e Hargreaves-Samani, apresentaram melhores resultados quando comparados ao método padrão, mostrando-se como alternativas para a estimativa da E_{T0} na região de Arapiraca, AL.

PALAVRAS-CHAVE: Manejo de irrigação, consumo hídrico, uso racional da água

¹ Mestranda em Engenharia Agrícola, UFRPE, Recife – Pernambuco. E-mail: sirleidemeneses@hotmail.com

² Mestranda em Engenharia Agrícola, UFRPE, Recife – Pernambuco. E-mail: fernanda_andrade89@hotmail.com

³ Graduanda de Engenharia Agrícola, UFRPE, Recife – Pernambuco. E-mail: aninha080699@gmail.com

⁴ Mestrando em Engenharia Agrícola, UFRPE, Recife – Pernambuco. E-mail: andrethyago@gmail.com

⁵ Mestranda em Engenharia Agrícola, UFRPE, Recife – Pernambuco. E-mail: dayanefarias17@yahoo.com

⁶ Graduanda de Agronomia, UFAL, Arapiraca – Alagoas. E-mail: vanessa.barros.s1993@hotmail.com

ALTERNATIVE METHODS OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATION (ET_o) COMPARED TO THE STANDARD METHOD OF PENMAN-MONTEITH FAO 56 FOR ARAPIRACA-AL

ABSTRACT: Irrigation management aims to supply the ideal amount of water for crops, with the purpose of rationalizing the use of available water resources as well as reducing unnecessary expenditures with inputs and energy. The determination of reference evapotranspiration (ET_o) is directly related to water management in agriculture and is an important tool in estimating the water requirement of plants, as well as in the design of irrigation systems. To verify the suitability of alternative methods for ET_o estimation compared to the Penman-Montheith standard FAO 56, makes possible the use of these methods in regions whose information on climatological variables is incipient or where there is a deficiency in total monitoring of meteorological elements, which limits the application of the standard model. The objective of this study was to compare the alternative methods of estimate of ET_o Makkink (M-K), Hargreaves and Samani (H-S), Jensen and Haise (J-H), Priestley-Taylor (P-T) and FAO-Radiation (FAO-Rad) with the Penman-Montheith method (FAO 56) over a period of one year. The climatological data were acquired daily in an automatic meteorological station of the National Institute of Meteorology (INMET) located in the city of Arapiraca, located in Agreste of Alagoas, from January to December 2015. The evaluation of the methods was carried out by means of the coefficients of determinate (R^2) and correlation (r), Standard Error of Estimate (EPE) and concordance (d) and performance (c) indices. The methods FAO-Radiation and Hargreaves and Samani presented the best evaluation when compared to the Penman-Montheith method FAO 56, being shown as alternatives for the estimate of ET_o in the region of Arapiraca, AL. However, the methods of Makkink, Jensen and Haise, and Priestley-Taylor presented unsatisfactory results in the estimate of ET_o.

KEY WORDS: Irrigation management, water consumption, rational use of water

INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas enfrentados na agricultura brasileira é a escassez de recursos hídricos, que causa diversos transtornos para a economia do país já que a água é um dos principais insumos destinados para a produção de alimentos. Esse problema é ainda mais grave em alguns estados nordestinos brasileiros, como Alagoas. Por grande parte do território

alagoano está situado em uma região semiárida, cidades como Arapiraca, possuem algumas características como o baixo índice pluviométrico, a excessiva evaporação e a baixa disponibilidade de águas acumuladas superficialmente. Devido este problema, a adoção de técnicas racionais de manejo conservacionista do solo e da água são de fundamental importância para a sustentabilidade, de forma que se possa, economicamente, manter ao longo do tempo, esses recursos com quantidade e qualidade suficientes para a produção em níveis satisfatórios (WUTKE et al., 2000).

É fundamental compreender a real necessidade de água de uma cultura e fornecer a planta o que ela é capaz de consumir, buscando reduzir o desperdício de água na irrigação de uma lavoura e, conseqüentemente, os custos para o agricultor. Por isso, torna-se imprescindível conhecer estimativas de evapotranspiração de referência (ET_o) para tornar o sistema produtivo mais eficiente (Silva et al., 2002).

Conforme Allen et al. (2006), a ET_o pode ser definida como a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, coberta por uma grama hipotética com altura uniforme entre 0,08 m e 0,15 m, sem restrições de água, crescendo ativamente e sombreando completamente o solo. A evapotranspiração representa a ocorrência simultânea dos processos de transpiração das plantas e de evaporação do solo (Thornthwaite e Wilm, 1944).

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 FAO 56 (P-M) como padrão de cálculo da evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos (SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998). Essa equação também é aplicada para avaliar outros modelos que estimam a ET_o.

Todavia, há uma certa dificuldade em determinar todos os elementos climáticos que a equação de (P-M) solicita, uma vez que o custo dos equipamentos necessários para obter todos os dados é muito elevado, como uma estação meteorológica automática. Logo, Al-Ghobari (2000), relatou que, a maioria dos modelos de equações desenvolvidos não são universalmente aplicados, sem as modificações ou calibrações locais, além da situação da cultura ou condição climática, especialmente em clima seco e quente, como o que é predominante em Arapiraca. Então, torna-se mais vantajoso optar por modelos que exijam variáveis meteorológicas mais viáveis economicamente para a determinada região a ser estudada.

Esse trabalho teve como objetivo avaliar os métodos alternativos de estimativa da ET_o, Makkink (MAK), Hargreaves-Samani (H-S), Jensen-Haise (J-H), Priestley-Taylor (P-T) e FAO-Radiação (FAO-Rad), com o método de Penman-Montheith FAO 56 (P-M) durante o período de um ano, visando obter a equação que melhor se aplicada para a região de Arapiraca,

situada no estado de Alagoas.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dados fornecidos por uma estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na cidade de Arapiraca-AL, referentes ao período de janeiro a dezembro de 2015. A cidade de Arapiraca localiza-se no Agreste do estado de Alagoas, a 132 km da capital Maceió, com latitude de 09° 45' 58" S e longitude de 35° 38' 58" W, e altitude de 325 metros.

Os métodos seguintes foram empregados para a estimativa da evapotranspiração de referência:

Equação 1: Penman-Monteith parametrizado pela FAO (ALLEN et al., 1998) - ETo (P-M)

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta (R_n - G) + \frac{900}{(T_{med} + 273)} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (1)$$

Em que,

ETo - Evapotranspiração de referência, mm.dia⁻¹;

Δ - Inclinação da curva de pressão de vapor, kPa.°C⁻¹;

Rn - Radiação líquida total diária, MJ.m⁻².dia⁻¹;

G - Fluxo de calor no solo, MJ.m⁻².dia⁻¹;

T - Temperatura média diária do ar, °C;

u_2 - Velocidade do vento, m.s⁻¹;

e_s - Pressão de vapor saturado do ar, kPa;

e_a - Pressão de vapor atual, kPa;

γ - Parâmetro psicrométrico, kPa.°C⁻¹.

Equação 2: Método de Hargreaves-Samani (1985) - ETo (H-S)

$$ET_{o(HS)} = 0,0023 \cdot R_a (T + 17,8) \sqrt{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}} \quad (2)$$

Em que,

ETo - evapotranspiração de referência, mm.dia⁻¹;

Qo - irradiância solar extraterrestre, mm.dia⁻¹;

$T_{m\acute{a}x}$, $T_{m\acute{i}n}$ e $T_{m\acute{e}d}$ - temperatura máxima, mínima e média, respectivamente, °C.

Equação 3: Método de Makkink (1957) - ETo (MAK)

$$ETo = 0,61 W R_s - 0,12 \quad (3)$$

Em que, W é um fator de ponderação, calculado pela equação: $W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$

Equação 4: Método de Jensen-Haise (1963) - ETo (J&H)

$$ETo = R_s (0,0252T + 0,078) \quad (4)$$

Em que:

R_s - radiação solar ao nível do solo expressa em equivalente de evaporação, mm.dia⁻¹;

T - temperatura média do período, °C.

Equação 5: FAO-Radiação (FAO-Rad)

$$ETo = a + b\left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right)R_s \quad (5)$$

Em que,

a - 0,3 mm.dia⁻¹;

b - fator de ajustamento, que depende da umidade relativa média (UR_m) e da velocidade do vento do período diurno (U_d):

$$b = 1,066 - 0,0013 \cdot UR_m + 0,045 \cdot U_d - 0,002 \cdot UR_m \cdot U_d - 0,0000315(UR_m)^2 - 0,0011(U_d)^2$$

R_s - radiação solar à superfície (mm.dia⁻¹).

Equação 6: Método Priestley-Taylor (1972) - Eto (P-T)

$$\lambda ETo = \alpha W (R_n - G) \quad (6)$$

Em que,

α - parâmetro Priestley-Taylor;

R_n - radiação líquida (MJ.m⁻².dia⁻¹);

G - fluxo de calor do solo (MJ.m⁻².dia⁻¹);

λ - calor latente de evaporação (2,45 MJ.kg⁻¹); e

W - fator de ponderação dependente da temperatura do ar (T, em °C) e da constante psicrométrica, citado por Pereira et al.(2002):

$$W = 0,407 + 0,0145T \quad (0^\circ\text{C} < T \leq 16^\circ\text{C}),$$

$$W = 0,483 + 0,01T \quad (16^\circ\text{C} < T < 32^\circ\text{C}).$$

Avaliando estatisticamente o desempenho dos métodos de estimativa de evapotranspiração, buscou-se correlacionar os resultados obtidos por meio dos valores dos coeficientes de determinação (R^2) e de correlação (r), do Erro Padrão da Estimativa (EPE) e os

índices de concordância (d) e desempenho (c). Tomou-se como base os índices estatísticos propostos por Camargo e Sentelhas (1997), demonstrado a seguir:

$$c = r \cdot d \quad (7)$$

A Tabela 1 apresenta o critério seguido para a interpretação dos métodos pelo índice “c” para os valores médios diários de evapotranspiração de referência, proposto por Camargo e Sentelhas (1997).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios de ETo para a série de dados estudada na região de Arapiraca - AL, para os métodos de Penman-Monteith (P-M), Hargreaves-Samani (H-S), FAO-Radiação (FAO-Rad), Priestley-Taylor (P-T), Jensen-Haise (J-H) e Makkink (MAK), foram de: 3,69; 4,69; 3,87; 2,29; 6,61 e 6,49 mm.dia⁻¹, respectivamente.

A Figura 1 representa a análise de regressão linear entre os valores estimados de ETo, assim como os coeficientes de determinação (R²) para as regressões completas, considerados durante todo o ano de 2015. É possível observar, por meio das Figuras 1(A), 1(B), 1(D) e 1(E) que os métodos H-S, FAO-RAD, J-H e MAK, superestimaram os valores de ETo em relação ao método Penman-Monteith em: 26,89; 4,62; 65 e 75,43%, respectivamente. O método P-T, (Figura 1C), subestimou os valores de ETo, também em comparação com o método de Penman-Monteith (P-M) em 38,17%.

Estes resultados corroboram com os que foram obtidos por Tagliaferre et al. (2010), em um estudo comparativo de diferentes metodologias para a determinação da ETo na cidade de Eunápolis, BA. Observaram que o método H-S superestimou P-M em 23%, enquanto P-T subestimou os valores obtidos pelo método padrão. Segundo os autores, em relação a H-S, apesar de o método apresentar simplicidade no seu uso, a sua adoção em determinadas condições climáticas deverá ser aplicada desde que se utilize um coeficiente de ajuste ou correção para evitar a superestimativa no consumo de água pelas culturas.

Dantas et al. (2016), ao estimar a ETo por diferentes métodos, para mesorregiões do estado da Paraíba, determinaram que, para o litoral paraibano, o método P-M foi superestimado pelo método J-H, que apresentou ETo de 1,99 mm dia⁻¹. Já para as mesorregiões Borborema e sertão paraibano, o método H-S subestimou P-M, enquanto J-H superestimou P-M, com variação de 0,56 mm dia⁻¹, para ambas mesorregiões.

No que se refere ao índice “c” que avalia a precisão (concordância) dos valores estimados de ETo pelos métodos avaliados, na Tabela 2, todos os métodos analisados e comparados com o método de Penman-Monteith demonstraram valores na faixa de 0,85 a 1,20, sendo considerados de boa concordância.

Oliveira et al. (2015), ao analisarem estimativas de ETo para o cultivo de cebola irrigada, observaram que, para o índice de concordância de Willmott (d), os métodos H-S, MAK e J-H apresentaram os seguintes resultados: 0,67; 0,61; 0,82, respectivamente. Demonstra um resultado muito próximo do alcançado.

Em relação ao índice “c”, descrito na Tabela 2, o método mais satisfatório foi o P-T (1,04), classificado como “ótimo” desempenho. Os métodos H-S (0,71), FAO-RAD (0,73) e J-H (0,74) foram classificados como “bom” para o critério de desempenho. O método que obteve o menor desempenho foi o MAK (0,62), classificando-se como “mediano”.

Araújo et al. (2007), obtiveram um resultado próximo em relação ao índice de desempenho “c”. Os autores relataram que, para Boa Vista, capital do estado de Roraima, os métodos MAK e H-S foram classificados como péssimo e sofrível, respectivamente.

As eficiências do ajuste linear dos métodos analisados podem ser analisadas, também, através dos valores obtidos para o erro padrão de estimativa (EPE), apresentando-se em uma faixa de 0,87 a 3,01, sendo: H-S (1,23); FAO-RAD (0,87); P-T (1,71); J-S (2,54); e MAK (3,01).

CONCLUSÃO

Os métodos FAO-Radiação e Hargreaves-Samani apresentaram a melhor avaliação quando comparados ao método de Penman-Montheith FAO 56, mostrando-se como alternativas para a estimativa da ETo na região de Arapiraca, AL. Já os métodos de Makkink, Jensen-Haise, e Priestley-Taylor apresentaram resultados insatisfatórios na estimativa da ETo.

REFERÊNCIAS

- AL-GHOBARI, H. M. Estimation of reference evapotranspiration for southern region of Saudi Arabia. *Irrigation Sciencem*, v.19, n.2, p 81-86, 2000.
- ALLEN R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. et al. *Crop evapotranspiration*. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56). 297p

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, J. Evapotranspiration del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 2006. 298 p. (Estudio Riego e Drenaje Paper, 56).

ARAÚJO, W. F.; COSTA, S. A. A.; SANTOS, A. E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para Boa Vista, RR. Revista Caatinga, V.20, n.4, p.84-88, 2007. Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, Brasil.

DANTAS, G. F.; OLIVEIRA, V. M. R.; DALRI, A. B.; PALARETTI, L. F.; SANTOS, M. G.; FARIA, R. T. Desempenho de métodos na estimativa de evapotranspiração de referência para o estado da Paraíba, Brasil. Revista Irriga, Botucatu, v.21, n.3, p.481-490, 2016.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature, Chicago: American Society Agricultural Engineering Meeting, (Paper 85-2517). 1985.

JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. J. of the Irrig. and Drain. Division, ASCE. v.89, p.15-41, 1963.

MAKKINK G. F. Examen de la fórmula de Penman. Neth. J. Agric. Sci. v.5, p.290-305, 1957. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162004000100011>

OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. de M. V. B. R.; BISPO, R. de C.; SANTOS, I. M. S.; CARVALHO, A. R. P. de; SANTOS JÚNIOR P. P. Avaliação de métodos de estimativas da evapotranspiração de referência em um cultivo de cebola irrigada. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 3. 2015, Fortaleza. Anais eletrônicos... Fortaleza: INOVAGRI, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.12702/iii.inovagri.2015-a116>. Acesso em 27 jun. 2017.

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

SILVA, V. de P. R.; GUEDES, M. J. F.; LIMA, W. F. A.; CAMPOS, J. H. B. C. Modelo de previsão de rendimento de culturas de sequeiro, no semiárido do Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.6, n.1, p.83-87, 2002.

SMITH, M. Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements: Rome: FAO, 1991. 54 p.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R. A. de J.; FELIZARDO, A. R.; SANTOS, L. da C.; SILVA, C. dos S. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração

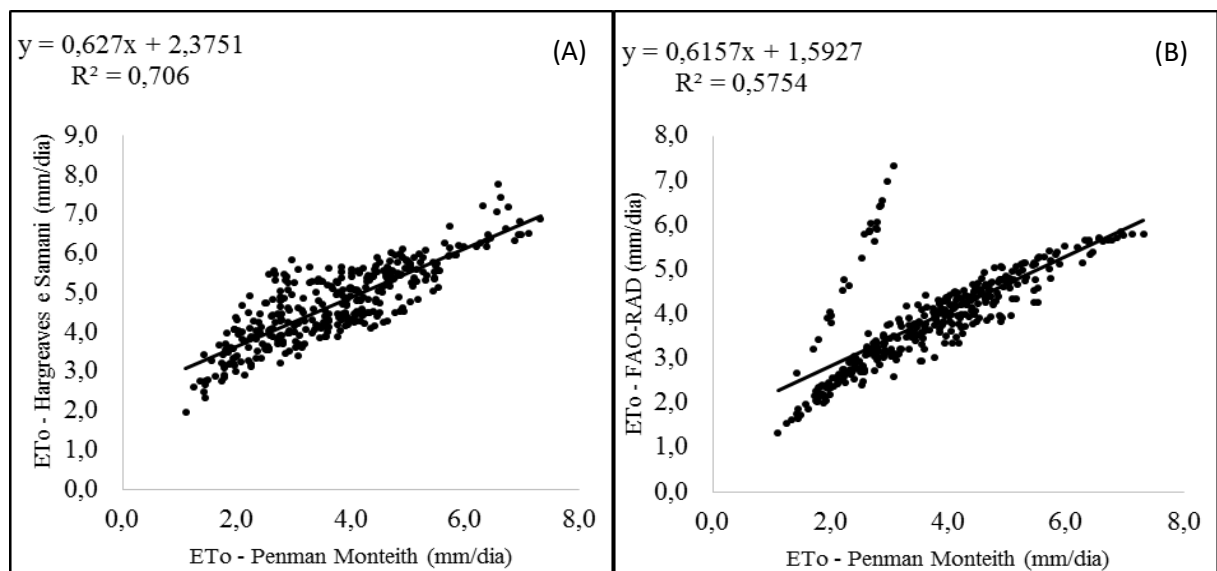
de referência em Eunápolis – BA. Revista Caatinga, V. 23, n. 1, p. 103-111, 2010. Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, Brasil.

THORNTHWAITE, C. W.; WILM, H. G. Report of the committee on evapotranspiration and transpiration 1943-1944. Transactions of the American Geophysical Union, Washington, v.25, part 5, p.686-693, 1944.

WUTKE, E. B.; ARRUDA, F. B.; FANCELLI, A. L.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; SAKAI, E.; FUJIWARA, M.; AMBROSANO, G. M. B. Propriedades do solo e sistema radicular do feijoeiro irrigado em rotação de culturas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.24, n.3, p.621-33, 2000.

Tabela 1. Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa de ETo, pelo índice “c”.

Valor de “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 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo



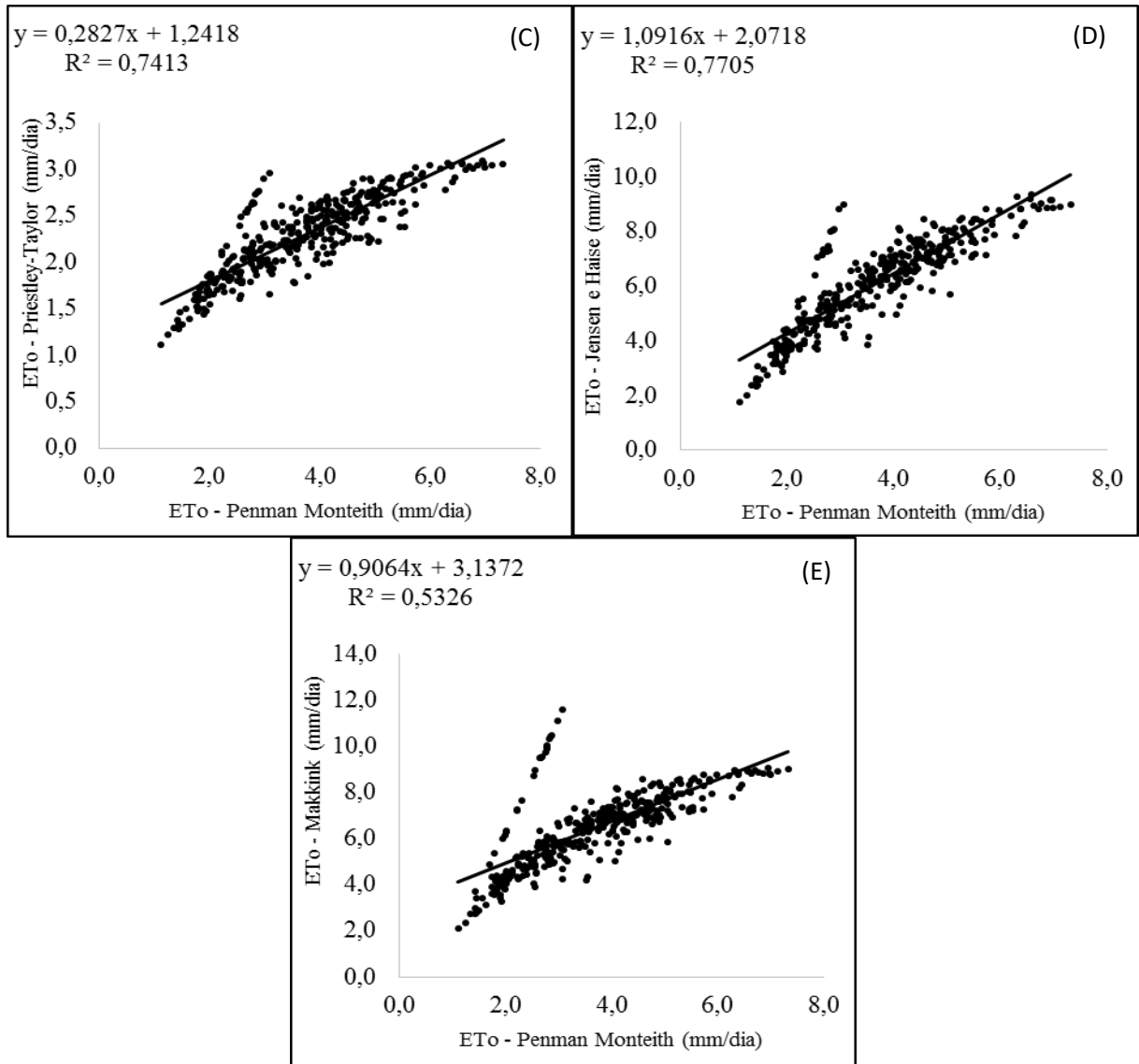


Figura 1. Regressão linear entre os valores diários de evapotranspiração de referência (ETo), estimados segundo o método de Penman-Monteith (eixo x) em relação aos métodos Hargreaves-Samani (A); FAO-RAD (B); Priestley-Taylor (C); Jensen-Haise (D); e Makkink (E) (eixo y).

Tabela 2. Comparação dos índices: coeficiente linear da equação de regressão (a), coeficiente de determinação (R²), índice de concordância de Willmontt (d), coeficiente de correlação (r), índice de desempenho (c) e erro padrão da estimativa (EPE).

Método testado	a	R ²	r	d	c	Desempenho	EPE
Hargreaves-Samani	0,627	0,71	0,84	0,85	0,71	Bom	1,23
FAO-RAD	0,6157	0,58	0,76	0,97	0,73	Bom	0,87
Priestley-Taylor	0,2827	0,74	0,86	1,20	1,04	Ótimo	1,71
Jensen-Haise	1,0916	0,77	0,88	0,85	0,74	Bom	2,54
Makkink	0,9064	0,53	0,79	0,85	0,62	Mediano	3,01