

Validação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Palmeira das Missões, RS, Brasil

**Validation of reference evapotranspiration estimation methods for Palmeira das Missões, RS,
Brazil**

**Validación de métodos de estimación de la evapotranspiración de referencia para Palmeira das
Missions, RS, Brasil**

Recebido: 23/11/2021 | Revisado: 01/12/2021 | Aceito: 14/12/2021 | Publicado: 22/12/2021

Bruna de Villa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2401-7312>
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
E-mail: bruna.devilla.58@hotmail.com

Felipe Tonetto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1516-7837>
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
E-mail: tonetoagronomia@gmail.com

Mirta Teresinha Petry

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4933-607X>
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
E-mail: mirta.petry@gmail.com

Juliano Dalcin Martins

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2501-1067>
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
E-mail: julianodalcinmartins@gmail.com

Luciene Kazue Tokura

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9758-0141>
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil
E-mail: lucienetokura@gmail.com

Alessandro Stefanello

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2128-2548>
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
E-mail: alessandrostefanello@gmail.com

Matheus Schudikin

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8659-1152>
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
E-mail: matheus.schudikin@gmail.com

Giane Lavarda Melo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8959-9763>
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
E-mail: giane.lavarda@gmail.com

Diego Dambrós Londero

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8049-9427>
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
E-mail: dlondero96@gmail.com

Anderson Luiz Fagan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4715-9740>
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
E-mail: fagan.adm@gmail.com

Guilherme Alex Hünemeier

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6585-677X>
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
E-mail: guialex129@gmail.com

Elton Ferreira Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5725-6811>
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
E-mail: elton110@hotmail.com

Luiz Henrique Marques Copetti

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9292-9770>
Universidade Federal de Santa Maria, Brasil
E-mail: luizcopettimarques@gmail.com

Resumo

A água é um elemento importantíssimo para o desenvolvimento das culturas agrícolas, pois é parte de suas estruturas e meio de transporte de nutrientes. Atender a demanda hídrica da cultura é fundamental para o dimensionamento do sistema de irrigação e contribuir para o aproveitamento sustentável dos recursos hídricos. A evapotranspiração de referência (ET_o) é uma das variáveis relacionadas a quantidade de água que deve ser distribuída por unidade de área. Sua determinação pode ser realizada através de diferentes métodos. Este estudo teve por objetivo avaliar dez modelos de estimativa da ET_o diária, para a região de Palmeira das Missões-RS. O desempenho dos métodos foi avaliado através de uma série de indicadores estatísticos, em relação ao método FAO Penman-Monteith (FAO-PM). Os dados foram obtidos da estação meteorológica automática de Palmeira das Missões, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e compreendem o período entre o dia 01/07/2008 a 09/01/2021, com 244 número de amostragens. As avaliações dos métodos foram realizadas utilizando o conjunto total dos dados. Os métodos foram confrontados através de regressão (b_o), da regressão linear simples (R^2), dos indicadores estatísticos, como o coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de Camargo e Sentelhas (c), índice de Willmott (d), erro médio absoluto (MAE) e a raiz quadrada do erro médio absoluto (RQME). Para as condições micrometeorológicas de Palmeira das Missões-RS, os métodos de Penman e Jesen-Haise foram os que melhor estimaram ET_o quando comparado com o padrão FAO-PM.

Palavras-chave: FAO-PM; Radiação solar; Temperatura do ar.

Abstract

Water is a very important element for the development of agricultural crops, as it is part of their structures and means of nutrient transport. Meeting the water demand of the crop is fundamental for the dimensioning of the irrigation system and contributing to the sustainable use of water resources. Reference evapotranspiration (ET_o) is one of the variables related to the amount of water that must be distributed per unit area. Their determination can be accomplished through different methods. This study aimed to evaluate ten daily ET_o estimation models for the Palmeira region of Missões-RS. The performance of the methods was evaluated through a series of statistical indicators, in relation to the FAO Penman-Monteith (FAO-PM) method. The data were obtained from the automatic weather station of Palmeira das Missões, belonging to the National Institute of Meteorology (INMET) and comprise the period between 01/07/2008 until 09/01/2021, with 244 number of samples. The evaluations of the methods were performed using the total set of data. The methods were confronted through regression (b_o), simple linear regression (R^2), statistical indicators, such as the Pearson correlation coefficient (r), Camargo and Sentelhas index (c), Willmott index (d), absolute mean error (MAE) and the square root of the mean absolute error (RQME). For the micrometeorological conditions of Palmeira of the Missions-RS, the methods of Penman and Jesen-Haise were the ones that best estimated the ET_o when compared to the FAO-PM standard.

Keywords: FAO-PM; Solar radiation; Air temperature.

Resumen

El agua es un elemento importantísimo para el desarrollo de los cultivos agrícolas, pues es parte de sus estructuras y medio de transporte de nutrientes. Atender la demanda hídrica de la cultura es fundamental para el dimensionamiento del sistema de riego y contribuir para el aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos. La evapotranspiración de referencia (ET_o) es una de las variables relacionadas con la cantidad de agua que debe distribuirse por unidad de área. Su determinación se puede realizar a través de diferentes métodos. Este estudio tuvo por objetivo evaluar diez modelos de estimación de la ET_o diaria, para la región de Palmeira de las Misiones-RS. El funcionamiento de los métodos se ha evaluado mediante una serie de indicadores estadísticos en relación con el método FAO Penman-Monteith (FAO-PM). Los datos fueron obtenidos de la estación meteorológica automática de Palmeira das Missões, perteneciente al Instituto Nacional de Meteorología (INMET) y comprenden el período entre el día 01/07/2008 a 09/01/2021, con 244 número de muestreos. Las evaluaciones de los métodos se realizaron utilizando el conjunto total de datos. Los métodos fueron confrontados a través de regresión (b_o), regresión lineal simple (R^2), de los indicadores estadísticos, como el coeficiente de correlación de Pearson (r), índice de Camargo y Frases (c), índice de Willmott (d), error medio absoluto (MAE) y raíz cuadrada del error medio absoluto (RQME). Para las condiciones micrometeorológicas de Palmeira de las Misiones-RS, los métodos de Penman y Jesen-Haise fueron los que mejor estimaron la ET_o cuando comparado con el estándar FAO-PM.

Palabras clave: FAO-PM; Radiación solar; Temperatura del aire.

1. Introdução

O uso racional da água na agricultura é importante, não somente visando atender as necessidades hídricas das plantas, mas também, o seu uso para fins domésticos e da indústria, de forma a garantir a disponibilidade deste recurso para as gerações futuras. Segundo Pereira (2017), uma maneira de melhorar o uso da água implica em melhorar as estimativas da evapotranspiração das culturas (ET_c), que passa pela estimativa acurada da evapotranspiração de referência (ET_o), a qual

desempenha um papel fundamental nesse processo, por representar a demanda evaporativa da atmosfera.

A medição direta da ET_o é praticamente impossível em muitas situações (Almorox et al., 2015), fazendo que a sua estimativa por intermédio de modelos matemáticos ou empíricos seja o usual, tendo o método FAO56 Penman-Monteith (FAO-PM) o mais recomendado, sendo também utilizado para a avaliação de outros métodos. Na predileção por um método para a determinação da evapotranspiração devem ser levados em consideração a praticidade, acurácia e precisão. Apesar de grande parte dos momentos disponíveis serem baseados em princípios físicos, apresentam limitações, principalmente quanto a acessibilidade de dados e adequação a determinadas condições locais, o que pode restringir a sua utilização (Berlato & Molion, 1981).

A equação de FAO-PM foi parametrizada como o método padrão para estimar a ET_o , por ter base física, envolvendo todos os parâmetros que governam as trocas de energia de uma vegetação uniforme, podendo ser facilmente calculada a partir de dados meteorológicos (Pereira et al., 2015). Entretanto, por ser dependente de muitas variáveis meteorológicas para o seu cálculo, que podem não estar disponíveis nos locais de avaliação (Paz & Thebaldi, 2018) ou terem baixa acurácia (Popova et al., 2006). Allen, Pereira e Smith (1998) sugerem métodos alternativos, baseados na radiação solar, na temperatura ou evaporação do Tanque Classe A.

Os métodos baseados na temperatura são particularmente interessantes, pois essa é uma variável facilmente obtida em estações meteorológicas (automáticas ou convencionais), sendo, também, os métodos mais simples, segundo Carvalho, Rios, Miranda e Castro Neto (2011). Hargreaves-Samani (1985), Blaney-Cridle, Camargo (1971), Benevides-Lopes e Linacre (1977), embora o Benevides-Lopes envolva outras variáveis meteorológicas, como a umidade relativa do ar. Entre os métodos baseados na radiação solar estão os de Jensen-Haise, Turc, Makkink, Priestley-Taylor e Taner e Pelton. O método Jensen-Hayse (1963) apresenta melhores estimativas para regiões áridas e semi-áridas (Pereira et al., 1997), enquanto, Hargreaves-Samani superestima as estimativas da ET_o em clima frio e úmido, quando comparadas com as de PM (Temesgen et al., 2005; Trajkovic, 2007). O método Benevides-Lopes foi desenvolvido por Garcia Benevides e Lopes Dias em 1970, se baseando em dados de temperatura média do ar e umidade relativa do ar (Matos & Silva, 2016). Ele tem sua fórmula adaptada as condições compreendidas entre 15° N e 15° S de latitude (Benevides-Lopes, 1970).

O método de Camargo leva em consideração a radiação solar global incidente extraterrestre (Camargo & Camargo, 2000). Além disso, Camargo fez uma substituição do índice I pelo T, que corresponde a temperatura média anual da região (Pereira et al., 1997). Já o de Linacre necessita das informações de altitude, latitude, temperatura do ar e do ponto de orvalho (Pereira et al., 1997). Conforme Hallal, Schöffel, Brixner e Cunha (2017) este método não foi capaz de reproduzir o Penman-Monteith, pois é um método mais simples e menos sensível. Makkink foi desenvolvido para o oeste europeu, condições climáticas de Wageningen (Holanda), no qual a umidade do ar geralmente é superior a 50% (Kashyap & Panda, 2001), com tendências de subestimativa da ET_o . O método utiliza as variáveis da radiação global, declividade da curva de pressão de vapor e constante psicrométrica. Este método é baseado em Penman, tendo bons resultados em clima úmido (Rosemberg et al., 1983). Priestley-Taylor é uma aproximação da equação de Penman-Monteith, sendo que nesse método a ET_o depende da radiação solar e da temperatura do ar, desprezando a influência do déficit de pressão de vapor, utilizando as variáveis: saldo de radiação, fluxo de calor, constante psicrométrica e declividade da curva de pressão, podendo subestimar a ET_o em regiões áridas, devido ao efeito da advecção (Xie & Wang, 2020), sendo a equação usada em modelos de desenvolvimento de culturas, como o CERES, EPIC, entre outros (Er-Raki et al., 2010). O método de Turc utiliza as variáveis de temperatura máxima, e umidade relativa do ar para estimar a evapotranspiração. Esse método apresentou o desempenho muito bom, como observado no estudo de Fanaya Júnior, Lopes, Oliveira e Jung (2012). Tanner-Pelton é baseado no saldo de radiação ou balanço de radiação (Caporusso & Rolim, 2015), tendo excelente desempenho na avaliação da ET_o para Santa Maria (Medeiros et al., 1998).

Penman-Monteith possui base física para estimar a ET_o , podendo ser usado em larga escala sem ajustes adicionais nos

parâmetros da equação. Entretanto, a ET_o é variável, tanto sazonal como espacial, determinada principalmente pela presença de precipitação pluvial (Rubert et al., 2018). Assim, a utilização de determinado método para estimar a ET_o , na ausência de alguns parâmetros climáticos, depende justamente da variável faltante e do propósito da pesquisa (ER-Raki et al., 2010). Assim, este estudo teve por objetivo avaliar dez métodos de estimativa da ET_o em relação ao método de estimativa padrão de Penman-Monteith, para Palmeira das Missões-RS, identificando as correlações e similaridades entre as estimativas mediante os indicadores estatísticos.

2. Metodologia

2.1 Caracterização do local

A ET_o foi estimada usando diferentes métodos de computação, para Palmeira das Missões - RS, situada nas coordenadas geográficas de -27.920339°S , -53.318049°W e altitude de 614 m. Dados diários de temperatura mínima (T_{\min} , $^\circ\text{C}$), máxima (T_{\max} , $^\circ\text{C}$) e média do ar (T_{med} , $^\circ\text{C}$); umidade relativa mínima, máxima e média (%), radiação solar (R_s , $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), precipitação pluvial (mm), e velocidade do vento a 10 m de altura (m s^{-1}), oriundas de uma estação meteorológica automática, foram baixados junto e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), disponível em www.inmet.gov.br. Os dados compreenderam o período de 01/07/2008 até 09/01/2021 (englobando todos os dias desta série histórica).

2.2 Processamento dos dados

Primeiramente fez-se a análise da qualidade dos dados meteorológicos, como a existência de dias onde a T_{\min} foi maior que a T_{\max} , a $RH_{\min} < RH_{\text{med}}$ e RH_{max} , além do padrão da R_s em relação à R_{s0} (radiação solar de dias completamente limpos), ou seja, a $R_s < R_{s0}$. Em dias de poucas nuvens, sobretudo no verão, espera-se que a R_s se aproxima da R_{s0} . Posteriormente, converteu-se a velocidade do vento de 10 para 2 metros de altura, segundo Allen et al. (1998).

Os distintos métodos testados foram comparados com o método de Penman-Monteith. As avaliações dos métodos foram realizadas utilizando-se os valores diários da temperatura máxima ($^\circ\text{C}$), mínima ($^\circ\text{C}$) e média ($^\circ\text{C}$) do ar, umidade relativa do ar (%), temperatura do ponto de orvalho ($^\circ\text{C}$), velocidade média do vento a 2 m de altura (m s^{-1}), pressão atmosférica (hPa), pressão de saturação de vapor d'água no ar (hPa), pressão parcial de vapor d'água no ar (hPa), radiação atmosférica ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e insolação (h) para todo o período avaliado neste estudo.

2.3 Descrição dos métodos utilizados para o cálculo da ET_o

A evapotranspiração de referência foi calculada através dos métodos: Penman-Monteith, Penman, Priestley-Taylor, Tanner-Pelton, Makkink, Jansen-Haise, Hargreaves-Samani, Camargo, Benevides-Lopes, Turc e Linacre (Tabela 1).

Tabela 1. Detalhamento dos métodos de estimativa da ETo, mostrando os parâmetros de entrada de cada modelo e a referência de cada método.

Método	Fórmula	Referência
Penman-Monteith-FAO56	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$	Allen et al. (1998)
Penman (1948)	$ET_o = \frac{\frac{\Delta R_n}{\gamma 2.45} + (0.2625 + 1.38u_2)(e_s - e_a)}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1}$	Penman (1948)
Priestley-Taylor	$ET_o = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_n - G}{\lambda}$	Priestley-Taylor (1972)
Makkink	$ET_o = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_s}{2.45} - 0.12$	Makkink (1957)
Jensen-Haise	$ET_o = R_s (0.0025T + 0.078)$	Jensen, Burman e Allen (1990)
Hargreaves	$ET_o = 0.0135K_{RS} \frac{R_a}{\lambda} (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} (T + 17.8)$	Hargreaves e Samani (1985)
Camargo	$ET_o = FR_a T$	Camargo (1971)
Benevides-Lopes	$ET_o = 1.21 \cdot 10^{\frac{7.45T}{234.7T}} (1 - 0.01RH_{mean}) + 0.21T - 2.30$	Benevides-Lopes (1970)
Turc	$ET_o = 0.013 \left[T_{\max} (T_{\max} + 15)^{-1} (50 + 23.88R_s) \right]$	Turc (1961)
Linacre	$ET_o = \frac{500 \left(\frac{T + 0.006h}{100 - \varphi} \right) + 15(T - T_{dew})}{(80 - T)}$	Linacre (1977)
Tanner-Pelton	$ET_o = 1.12 \left[\left(\frac{R_n \times 100}{4.18} / 59 \right) \right] - 0.11$	Tanner e Pelton (1960)

ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); Δ = declividade da curva de pressão (kPa °C⁻¹); R_n = saldo de radiação (MJ m⁻² dia⁻¹); G = fluxo de calor (MJ m⁻² dia⁻¹); γ = constante psicrométrica (MJ kg⁻¹); T = temperatura média (°C); U_2 = velocidade do vento a 2 m (m s⁻¹); e_s = pressão de saturação de vapor (kPa); e_a = pressão de vapor (kPa); T_{\max} = temperatura máxima (°C); T_{\min} = temperatura mínima (°C); R_a = Radiação extraterrestre (mm.dia⁻¹); R_s = radiação solar (MJ m⁻² dia⁻¹); λ = calor latente de vaporização (MJ.mm⁻¹); RH_{mean} = umidade relativa média (%); h = altitude do local (m); φ = latitude em módulo (graus); T_{dew} = temperatura do ponto de orvalho (°C).

Para o método de Camargo, para T até 23°C, F = 0,01; T = 240°C, F = 0,0105; T = 25°C, F = 0,011; T = 26°C, F = 0,0115; Tm > 260°C, F = 0,012.

Fonte: Jensen et al. (1990) e Pandey et al., (2016)

2.4 Indicadores e coeficientes de comparação entre os distintos métodos com o padrão

A comparação entre o método padrão e os demais foi calculada através da regressão linear ($Y_i = a + b\hat{Y}_i$) para obtenção dos coeficientes a e b e determinação do R². Também foi aplicado o coeficiente de correlação de Pearson (r), a raiz do quadrado médio do erro (RQME), o b₀, da equação linear forçada à origem, o índice de Willmott (d) (Willmott, 1981) e o índice de Camargo e Sentelhas (c) (1997), conforme as equações:

Coeficiente de concordância (Equação 1).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (1)$$

Coefficiente de correlação de Pearson (Equação 2).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)(P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}} \quad (2)$$

Índice de confiança (Equação 3).

$$c = r.d \quad (3)$$

Raiz do quadrado médio do erro, erro padrão estimado (Equação 4).

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (4)$$

Erro médio absoluto (Equação 5).

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (5)$$

Coefficiente de regressão (Equação 6).

$$b_o = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2} \quad (6)$$

Os valores do coeficiente de correlação (r) (Camargo & Sentelhas, 1997) e do índice de desempenho ou confiança (c) (Cohen, 1988) encontrados são parâmetros fundamentais para classificar os modelos (Quadro 1).

Quadro 1. Classificação do coeficiente de correlação (r) e do índice de desempenho (c).

R	Correlação	C	Desempenho
> 0,9	Quase perfeita	> 0,85	Ótimo
0,7 – 0,9	Muito alta	0,76 a 0,85	Muito Bom
0,5 – 0,7	Alta	0,66 a 0,75	Bom
0,3 – 0,5	Moderada	0,61 a 0,65	Mediano
0,1 – 0,3	Baixa	0,51 a 0,60	Sofrível
0,0 – 0,1	Muito baixa	0,41 a 0,50	Mau
-	-	≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Cohen (1988), Camargo e Sentelhas (1997).

3. Resultados e Discussão

No Quadro 2 observa-se o comportamento das variáveis meteorológicas entre os anos de 2008 a 2021 obtidas na estação meteorológica automática de Palmeira das Missões-RS.

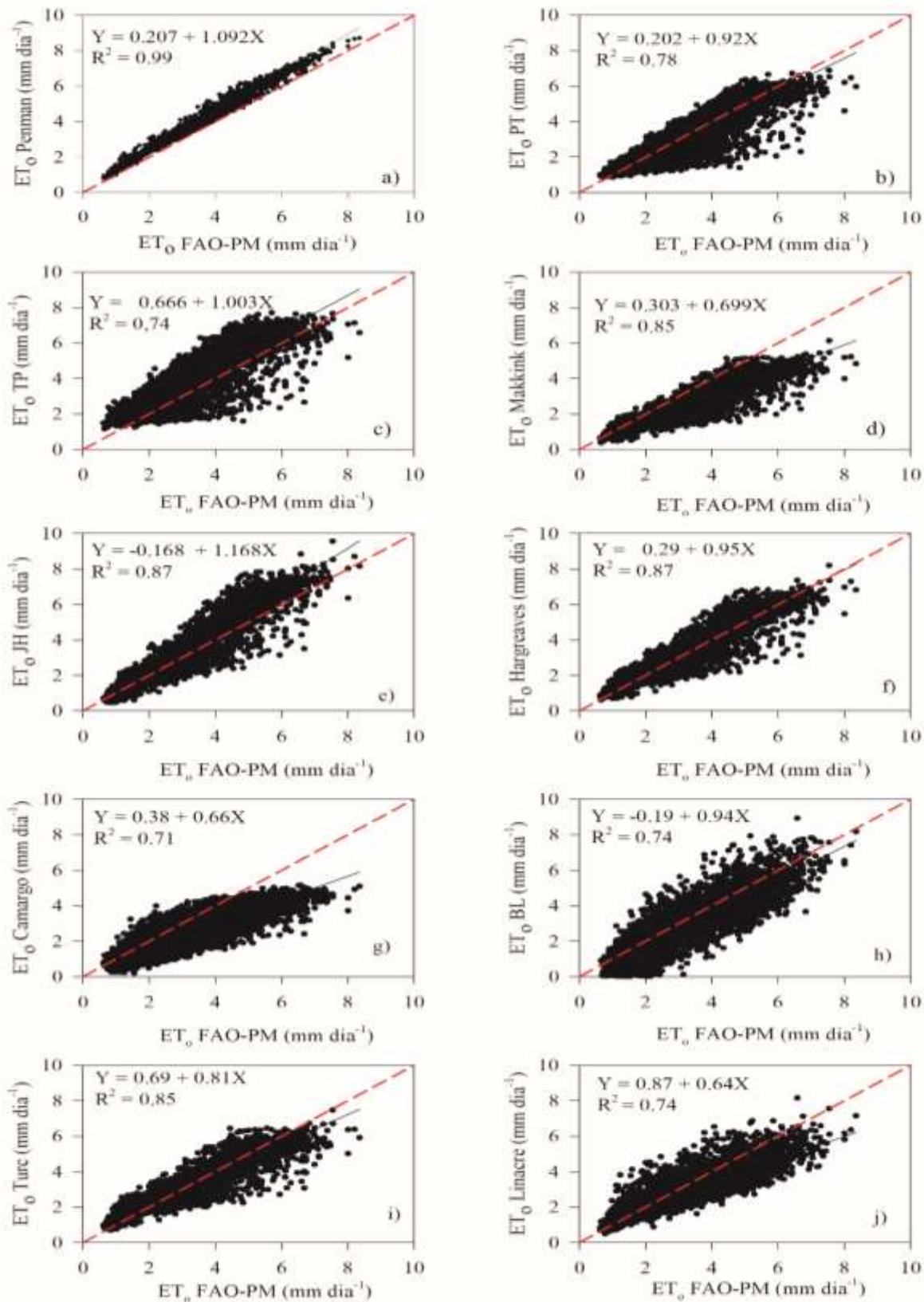
Quadro 2. Comportamento das variáveis meteorológicas entre os anos de 2008 a 2021 obtidas na estação meteorológica automática de Palmeira das Missões-RS.

Variáveis	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
T _{máx} (°C)	28,02	28,15	26,88	24,76	20,32	18,33	18,50	20,73	22,49	24,71	27,24	28,23
T _{mín} (°C)	18,42	18,54	16,77	15,13	12,16	10,12	9,79	10,97	12,41	14,31	15,90	17,68
T _{méd} (°C)	23,22	23,35	21,83	19,94	16,24	14,23	14,14	15,85	17,45	19,51	21,57	22,96
RH _{máx} (%)	92,56	93,11	91,79	90,21	91,85	90,30	88,64	88,47	90,99	91,26	88,85	89,67
RH _{mín} (%)	55,72	55,47	50,60	49,94	60,35	61,43	54,01	53,41	52,57	50,14	43,17	48,10
RH _{méd} (%)	74,14	74,29	71,19	70,08	76,10	75,87	73,10	70,94	71,78	70,70	66,01	68,89
Vento (m s ⁻¹)	1,82	1,90	1,72	1,75	1,79	2,00	2,07	2,33	1,84	1,95	1,91	1,91
ET _o (mm dia ⁻¹)	4,56	4,36	3,77	2,97	1,97	1,76	2,00	2,74	3,20	4,00	4,86	4,95
Chuva (mm)	5,27	5,01	3,71	3,94	5,36	4,93	4,70	3,54	4,44	6,98	5,52	4,85
Rs (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	21,01	19,52	17,30	13,72	10,06	8,90	9,80	12,69	15,90	19,22	22,29	22,32

T_{máx} = temperatura máxima; T_{mín} = temperatura mínima; T_{méd} = temperatura média; RH_{máx} = umidade relativa máxima; RH_{mín} = umidade relativa mínima; RH_{méd} = umidade relativa média; ET_o = evapotranspiração; R_s = radiação solar. Fonte: Autores.

Na Figura 1 observa-se a comparação entre a ET_o obtida por distintos métodos com o FAO-PM no período de 2008-2021, para Palmeira das Missões-RS.

Figura 1. Comparação entre a ET_0 obtida por diferentes métodos com o FAO-PM para o período 2008-2021, para Palmeira das Missões, RS.



Fonte: Autores.

Além do R^2 devem ser levados em consideração o índice de concordância (d), que quantifica matematicamente a dispersão do método testado em relação ao padrão, o coeficiente de correlação (r), que indica a precisão do método, e o índice “c”, que indica o desempenho do método (Camargo & Sentelhas, 1997), como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2. Índices e coeficientes de comparação entre os diferentes métodos de determinação da ET_o, entre o período de outubro/2019 a maio/2020 para Palmeira das Missões/RS.

Métodos	Índice e coeficientes de comparação							
	d	b _o	AAE	RMSE	c	r	Clas c	Clas r
Penman (PM)	0,97	1,14	0,52	0,57	0,96	0,99	O	QP
Priestley-Taylor (PT)	0,97	0,79	0,54	0,73	0,83	0,89	MB	MA
Tanner-Pelton (TP)	0,88	1,17	0,95	1,11	0,76	0,86	MB	MA
Makkink (MK)	0,87	0,77	0,75	0,96	0,80	0,92	MB	QP
Jensen-Haise (JH)	0,94	1,13	0,64	0,81	0,88	0,94	O	QP
Hargreaves-Samani (HS)	0,96	1,03	0,43	0,57	0,90	0,93	O	QP
Camargo (CM)	0,83	0,75	0,90	1,13	0,70	0,84	B	MA
Benevides-Lopes (BL)	0,91	0,89	0,73	0,92	0,78	0,86	MB	MA
Turc (TC)	0,96	0,99	0,42	0,58	0,88	0,92	O	QP
Linacre (LN)	0,88	0,85	0,72	0,90	0,73	0,83	B	MA

d: coeficiente de concordância, b_o: coeficiente da regressão forçada à origem, r: coeficiente de correlação de Pearson, c: índice de confiança, RMSE: raiz do quadrado médio do erro, AAE: erro médio absoluto; Clas c: classificação índice de confiança, Clas r: classificação coeficiente de correlação de Pearson. O: ótimo, MB: muito bom, B: bom, QP: quase perfeita, MA: muito alta. Fonte: Autores.

Verifica-se na Tabela 2 que os resultados obtidos para o coeficiente de correlação de Pearson “d” apontam que os melhores métodos são PM, HS, TC, PT, JH e BL. Apenas os métodos de Camargo e Linacre tiveram classificação muito próxima ao estudo realizado por Hallal et al. (2017), pois foram classificados com valores de 0,8 e 0,88 para o índice “d”. Já o estudo realizado por Conceição e Mandelli (2005) para a cidade de Bento Gonçalves também apontou o método HS (0,94) com ótimo desempenho. Em estudo realizado por Silva (2019) para a cidade de Alegrete, o autor obteve o valor de 0,78 para JH, sendo abaixo do estimado neste estudo.

Quanto ao índice de confiança “c” os resultados classificaram os métodos PM, JH, HS, BL e TC como ótimos em estimar a ET_o. Estando em concordância com os encontrados por Oliveira et al. (2015) na região do Rio Paranaíba – MG para JH (0,95; classificado como ótimo). Cavalcante Junior, Oliveira, Almeida e Espínola Sobrinho (2011) constataram desempenho “ótimo” (0,87) do método de JH para o período seco e “mediano” (0,63) para o período úmido em Mossoró/RN.

Em estudo realizado por Medeiros et al. (1998) nas circunstâncias meteorológicas de Santa Maria – RS, concluiu que o método de TP obteve um desempenho “muito bom” (0,76). Já para Silva (2019) JH, TC e TP tiveram desempenho “sofrível”, porém foram avaliados apenas com dados referentes a dois anos. Este resultado contrariou o que foi obtido neste estudo com dados de 12 anos, em que eles tiveram classificação como “ótimo” e “muito bom”. No estudo de Conceição e Mandelli (2005) os métodos de HS e MK apresentam classificação como “muito bom” e “ótimo”.

Pela avaliação do coeficiente de correlação de Pearson os métodos PM (0,99), MK (0,92), JH (0,94), HS (0,93) e TC (0,92) foram classificados como “quase perfeita”. O que indica que estes métodos de determinação da ET_o estimam com precisão esta variável. Em estudo de Brixner, Schöffel e Tonietto (2014) para a região da Campanha obteve resultados de 0,83 para MK, 0,78 para JH e 0,84 para HS diferindo do observado aqui, isto se deve a diferença da localização geográfica dos locais comparados. Pilau, Battisti, Somavilla e Righi (2012) realizou estudo comparativo de métodos para Palmeira das Missões para avaliar mensalmente os métodos de HS (0,96), MK (0,98) e CM (0,93). Os dois primeiros tiveram a mesma classificação que

neste estudo, enquanto para CM houve classificação divergente entre os dois trabalhos. Esta divergência mostra a necessidade de realizar mais estudos e com uma base de dados maior. Em estudo de Hallal et al. (2017) foi verificado que os métodos de JH (0,92), MK (0,90) e LI (0,86) apresentaram valores próximos ao deste estudo. E que ainda, os métodos de CA e HS tiveram estimativas menores ao que foi observado para Palmeira das Missões.

Ao se observar os valores do coeficiente angular observou-se que quando estes estão próximos de um, o método conseguiu estimar com boa aproximação ao PM FAO 56. Neste estudo PM, PT, TP, JH, HS e TC apresentaram comportamento próximo ao PM FAO-56. Segundo Cunha, Magalhães e Castros (2013), Penman-Original e Penman-FAO24 foram os que tiveram o coeficiente de regressão “a” mais próximo de zero e coeficiente “b” mais próximo da unidade, confirmando sua superioridade entre os demais métodos para estimativa da ET_0 nas condições climáticas de Chapadão do Sul, MS. Assim como na Tabela 2, Pilau et al. (2012) observou que o método de HS apresentou valor de coeficiente angular de 1,03 indicando este com um método preferencial a ser utilizado.

O MAE indica que quanto menor o seu valor mais preciso é o método. Assim PM, PT, JH, HS e TC foram os que apresentaram o menor erro médio absoluto e, portanto, maior precisão e acurácia. No estudo de Coutinho, Madeira, Silva, Oliveira e Delgado (2020) foram observados que o método de JH foi o que estimou com mais precisão a evapotranspiração, com AAE de 0,87 para Santa Maria Madalena. No estudo realizado por Hallal et al. (2017), os métodos de LN, JH, MK, CA e HS apresentaram valores de 0,91; 1,35; 0,6; 0,91 e 1,21 respectivamente. Dentre estes valores, apenas o de LN apresentou resultados semelhantes àqueles encontrados por Hallal et al. (2017), para Palmeira das Missões.

Como se observa na Tabela 2, os melhores resultados de EPE foram os métodos de PM (0,57), HS (0,57) e TC (0,58). Em estudo para a região da campanha Brixner et al. (2014) obteve valores muito elevados de EPE para os diferentes métodos com PM (25,75), LN (26,02), MK (20,77) e CM (14,71), em comparação aos valores de Palmeira das Missões estimados aqui. No seu estudo Jung, Biscaro, Oliveira, Alves e Giaccon (2016) obteve resultado para TC de 1,47 mm d⁻¹ para o EPE considerando o método como bom. De acordo com Pereira et al., (2009) o método que apresentou melhor desempenho mensal para a Serra da Mantiqueira foi o de Jesen-Haise com EPE de 0,23. Já em nosso estudo este método teve erro de 0,81 mm dia⁻¹. Provavelmente a diferença entre os resultados de Palmeira e os da Serra se deve a diferença de altitude e a proximidade do litoral.

4. Conclusão

Nas condições climáticas de Palmeira das Missões-RS, os métodos de Penman e Jesen-Haise foram os que melhor estimaram a evapotranspiração de referência (ET_0) em comparação ao padrão Penman-Monteith-FAO, no caso do Penman por levar em consideração um maior número de variáveis, o que torna esse método mais precisos e recomendado.

Assim através de estudos de diferentes métodos de ET_0 visou-se demonstrar qual o mais preciso e indicado de modo a utilizar de forma mais eficiente os recursos hídricos. Pretendendo-se informar pesquisadores, produtores e técnicos acerca do assunto a serem empregados nas diferentes culturas. Onde como sugestão para futuros trabalhos fica a realização/aplicação dos métodos a nível de estado, regiões fisiográficas e país como um todo, tornando assim o trabalho mais completo.

Referências

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO-56 Irrigation and drainage. 297p.
- Almorox, J., Quej, V. H., & Martí, P. (2015). Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Köppen climate classes. *Journal of Hydrology*, 528, 514-522. [10.1016/j.jhydrol.2015.06.057](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.057)
- Benavides, J. G., & Lopez Diaz, Y. J. (1970). Formula para el calculo de la evapotranspiracion potencial adaptada al tropico (15° N - 15° S). *Agronomia Tropical, Maracay*, 20(5), 335-345.

- Berlato, M. A., & Molion, L. C. B. (1981). *Evaporação e evapotranspiração*. Boletim Técnico. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Agronômicas – Departamento de Pesquisa. Secretaria da Agricultura. 95p.
- Brixner, G. F., Schöffel, E. R., & Tonietto, J. (2014). Determination of the evapotranspiration by different methods and its application in the dryness index in the Campanha Gaucha Region, Brazil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 36(4), 780-793. doi: 10.1590/0100-2945-381/13
- Camargo, A. P. (1971). *Balanço hídrico no Estado de São Paulo*. Instituto Agrônômico.
- Camargo, A. P., & Camargo, M. B. P. (2000). Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, 59(2), 125-137. 10.1590/S0006-8705200000200002
- 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(1), 89-97.
- Caporusso, N. B., & Rolim, G. S. (2015). Reference evapotranspiration models using different time scales in the Jaboticabal region of São Paulo, Brazil. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 37 (1), 1-9. doi: 10.4025/actasciagron.v37i1.18277
- Carvalho, L. G., Rios, G. F. A., Miranda, W. L., & Castro Neto, P. (2011). Evapotranspiração de referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 41(3), 456-465. 10.5216/pat.v41i3.12760
- Cavalcante Junior, E. G., Oliveira, A. D., Almeida, B. M., & Espínola Sobrinho, J. (2011). Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. *Semina: Ciências Agrárias*, 32(1), 1699-1708. 10.5433/1679-0359.2011v32Supl1699
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Lawrence Erlbaum.
- Conceição, M. A. F., & Mandelli, F. (2005). Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 13(2), 303-307.
- Coutinho, E. R., Madeira, J. G. F., Silva, R. M., Oliveira, E. M., & Delgado, A. R. S. (2020). Evaluation of Methods of Estimation of Evapotranspiration of Reference (ET_o) Daily for Regions of the States of Rio de Janeiro and Espírito Santo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(4), 649-656. 10.1590/0102-7786354006
- Cunha, F. F., Magalhães, F. F., & Castros, M. A. (2013). Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul-MS. *Engenharia na Agricultura*, 21(2), 159-175. 10.13083/reveng.v21i2.346
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Khabba, S., Simonneaux, V., Jarlan, L., Ouldaba, A., Rodriguez, J. C., & Allen, R. (2010). Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: Can weather forecast data be used as alternate of ground meteorological parameters? *Journal of Arid Environments*, 74, 1587-1596. 10.1016/j.jaridenv.2010.07.002
- Fanaya Júnior, E. D., Lopes, A. D., Oliveira, G. Q., & Jung, L. H. (2012). Métodos empíricos para estimativa da evapotranspiração de referência para Aquidauana, MS. *Irriga*, 17(4), 418-434. 10.15809/irriga.2012v17n4p418
- Hallal, M. O. C., Schöffel, E. R., Brixner, G. F., & Cunha, A. R. (2017). Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Pelotas, Rio Grande do Sul. *Revista de Ciências Agrárias – Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 60(1), 1-10. doi: 10.4322/rca.2322.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. 10.13031/2013.26773
- Jensen, M. E., Burman, R. D., & Allen, R. G. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. (2a ed.), ASCE, 733p.
- Jensen, M. E., & Haise, H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division-ASCE*, 4(1), 15-4.
- Jung, L. H., Biscaro, G. A., Oliveira, G. Q., Alves, M. A., & Giacon, G. M. (2016). Estimativa da evapotranspiração de referência em uma região do Alto Pantanal. *Magistra*, 28(2), 168-177.
- Kashyap, P. S., & Panda, R. K. (2001). Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management*, 50(1), 9-25. 10.1016/S0378-3774(01)00102-0
- Linacre, E. T. (1977). A simple formula for estimating evapotranspiration rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*, 18, 409-424.
- Makkink, G. F. (1957). Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers*, 11(3), 277-288.
- Matos, R. M., & Silva, P. F. (2016). Análise de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência mensal para o município de Barbalha-CE. *Agropecuária Científica no Semiárido*, 12(1), 10-21. doi: 10.30969/acsa.v12i1.661
- Medeiros, S. L. P., Manfron, P. A., & Bianchi, C. (1998). Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região mesoclimática de Santa Maria-RS. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 6(1), 105-109.
- Oliveira, V. M. R., Dantas, G. F., Palaretti, L. F., Dalri, A. B., Santos, M. G., & Fischer Filho, J. A. (2015). Estimativa de evapotranspiração de referência na região de rio Paranaíba-MG. *Irriga*, 20(4), 790-798. 10.15809/irriga.2015v20n4p790
- Pandey, P. K., Dabral, P. P., & Pandey, V. (2016). Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(1), 52-63. 10.1016/j.iswcr.2016.02.003
- Paz, L. R., & Thebaldi, M. S. (2018). Estimate of daily reference evapotranspiration at Formiga, MG, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 12(1), 7-17. doi: 10.18011/bioeng2018v12n1p7-17.

- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of Royal Society-Series A*, 193, 120-145.
- Pereira, A. R., Villa Nova, N. A., & Sedyama, G. C. (1997). *Evapotranspiração*. FEALQ, 183p.
- Pereira, D. R., Yanagi, S. N. M., Mello, C. R., Silva, A. M., & Silva, L. A. (2009). Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. *Ciência Rural*, 39(9), 2488-2493. 10.1590/S0103-84782009000900016
- Pereira, L. S. (2017) Water, agriculture and food: challenges and issues. *Water Resources Management*, 31(10), 2985-2999. 10.1007/s11269-017-1664-z.
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015) Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past and future. *Agricultural Water Management*, 147, 4-20. doi: 10.1016/j.agwat.2014.07.031.
- Pilau, F. G., Battisti, R., Somavilla, L., & Righi, E. Z. (2012). Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões, RS. *Ciência Rural*, 42(2), 283-290. 10.1590/S0103-84782012000200016.
- Popova, Z., Kercheva, M., & Pereira, L. (2006). Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data, application to south Bulgaria. *Irrigation and Drainage*, 55, 201-215. 10.1002/ird.228
- 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(2), 81-92. doi: 10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2
- Rosemberg, N. J., Blad, B. L., & Verma, S. B. (1983). *Microclimate: the biological environment*. (2a ed.), John Wiley & Sons, 495p.
- Rubert, G. C., Roberti, D. R., Pereira, L. S., Quadros, F. L. F., Campos Velho, H. F., & Moraes, O. L. L. Correction: Gisele Cristina Rubert et al., (2018). Evapotranspiration of the Brazilian Pampa Biome: Seasonality and Influential Factors. *Water*, 10, 1864. *Water*, 11(9), 1890. <https://doi.org/10.3390/w11091890>
- Silva, C. A. (2019). *Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração para Alegrete – RS*. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Agrícola, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha (IFFar, RS) e da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), Alegrete. 33p.
- Tanner, C. B., & Pelton, W. L. (1960). Potential evapotranspiration estimates by approximate energy balance method of Penman. *Journal of Geophysical Research*, 65(10), 3391-3413. 10.1029/JZ065i10p03391.
- Temesgen, B., Eching, S., Asce, M., Davidoff, B., & Frame, K. (2005). Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 73-84. 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(73)
- Trajkovic, S. (2007). Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(1), 38-42. 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:1(38)
- Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Annals of Agronomy*, 12(1), 13-49.
- Xie, R. H., & Wang, A. H. (2020): Comparison of ten potential evapotranspiration models and their attribution analyses for ten Chinese drainage basins. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(9), 959-974. 10.1007/s00376-020-2105-0
- Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 184-194. 10.1080/02723646.1981.10642213