



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Desempenho na estimativa da evapotranspiração de referência diária de 32 métodos no estado do Paraná

Tassie Turcato¹, Rosandro Boligon Minuzzi²

¹Acadêmica em agronomia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: tassieturcato@gmail.com

² Professor, Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: rbminuzzi@hotmail.com

Artigo recebido em 12/11/2023 e aceito em 02/07/2024

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na escala diária em sete municípios do Rio Grande do Sul. Foram utilizados dados meteorológicos diários de janeiro de 2015 a dezembro de 2020, donde foram estimadas a ET_o por Penman-Monteith como padrão e para 32 métodos a serem avaliados com o uso de seis indicadores (índices de confiança e de concordância, coeficientes de correlação e de determinação, erro quadrático médio e erro médio). Os métodos baseados na radiação de Ritchie, Stephens-Stew, Valiantzas-3, Souza-Silva e Hargreaves são indicados em todos os municípios para estimar a ET_o diária. Todos tiveram um 'ótimo' desempenho e apresentaram uma variação na estimativa inferior a 1 mm com tendência em subestimar a ET_o.

Palavras-chave: Radiação solar, Temperatura do ar, Umidade do ar.

Performance in estimating daily reference evapotranspiration of 32 methods in the State of Paraná, Brazil

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the performance of methods for estimating reference evapotranspiration (ET_o) on daily period in six cities in Paraná. Daily meteorological data from January 2015 to December 2020 were used, from which estimates were made the ET_o by Penman-Monteith as standard and for 32 methods to be evaluated using six indicators (confidence and concordance indexes, correlation and determination coefficients, mean squared error and mean error). The radiation-based methods of Ritchie, Stephens-Stew, Valiantzas-3, Souza-Silva and Hargreaves are recommended in all cities to estimate daily ET_o. All had an 'excellent' performance and presented a variation in the estimate of less than 1 mm with tendency to underestimate the ET_o.

Keywords: Solar radiation, Air temperature, Air humidity.

Introdução

A evapotranspiração (ET) é o processo de transporte de água na forma de vapor para a atmosfera de uma superfície vegetada, por meio da ocorrência simultânea de evaporação pela água do solo e da transpiração das plantas. O conceito inicial foi paulatinamente adaptado às diversas condições de vegetação naturais e das cultivadas até se chegar as definições atuais, as quais estão associadas a algum qualificativo como: potencial, real, máxima de cultura, de oásis e de referência (Pereira et al., 2013).

O termo evapotranspiração de referência (ET_o) foi utilizado pela primeira vez no início da

década de 1970, mas somente no boletim FAO-56 foi definido o conceito de ET_o como sendo aquela de uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência ao transporte de vapor d'água constante e igual a 70 s.m⁻¹ (Allen et al., 1998).

O método de Penman-Monteith (PM FAO-98) foi adotado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) como padrão para estimar a ET_o em regiões com diferentes condições climáticas, uma vez que incorpora tanto parâmetros físicos e aerodinâmicos, assim como, para validar outros métodos, principalmente aqueles que necessitam de uma menor quantidade de dados.

Apesar do aumento na disponibilidade de dados meteorológicos, principalmente decorrente do advento de estações automáticas, ainda há regiões desprovidas de dados, com baixa densidade de estações ou com poucos sensores/instrumentos. Além disso, acrescenta-se os eventuais problemas eletrônicos presentes neste tipo de estação meteorológica que resultam em dados duvidosos ou na ausência de elementos meteorológicos necessários para a aplicação do método de PM FAO-98, haja vista que os instrumentos destinados a medição da ET (lisímetros) por apresentarem dificuldades operacionais, praticamente são utilizados apenas em condições experimentais visando, principalmente desenvolver e calibrar métodos de estimativas (Pereira et al., 2013).

Araújo et al. (2012) afirmam que alguns métodos empíricos demandam uma quantidade menor de dados meteorológicos e podem ser considerados de boa aplicabilidade quando há ausência de dados instrumentais de ETo. No entanto, previamente a utilização desses métodos, se faz importante a avaliação das suas estimativas, principalmente em regiões com climas distintos e dos locais donde foram gerados tais métodos. Gao et al. (2017) avaliaram o desempenho de métodos empíricos em diferentes regiões climáticas na China e observaram que o de Priestley-Taylor e de Hargreaves apresentaram os melhores resultados em climas secos e semi-áridos, enquanto o método de Makkink estimou melhor nas regiões úmidas. Para diferentes regiões climáticas no Irã, Tabari (2010) ao avaliar quatro métodos (Makkink, Turc, Priestley-Taylor e Hargreaves), indicou o de Turc como o mais adequado na estimativa de ETo em clima frio-úmido e árido. Enquanto o de Hargreaves foi o mais preciso nas regiões com clima quente-úmido e semi-árido. Também no Irã, Amirshayeri et al. (2023) averiguaram que os métodos de Romanenko e Schendel tiveram melhores desempenhos do que a ETo estimada usando rede neural artificial. No nordeste da Índia, Pandey et al. (2016) indicaram os métodos de Irmak e de Turc como os de melhores desempenhos dentre 18 avaliados.

Como o desempenho de um método empírico para um local e escala de tempo não é garantia de que ele seja adequado ou inadequado

para outra região (Pereira et al., 2013), se faz necessário uma avaliação da sua eficácia previamente ao seu eventual uso. Ademais, estimar de forma precisa a evapotranspiração se faz importante para um bom planejamento de irrigação agrícola, para o manejo dos recursos hídricos e uma modelagem hidrológica eficientes (Kartal, 2024). Por isso, este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de 32 métodos na estimativa da ETo diária para alguns municípios do estado do Paraná.

Material e métodos

Foram utilizados dados diários de temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento a 10 metros de altura (u_{10}) e radiação solar (R_g), de janeiro de 2015 a dezembro de 2020, oriundos de seis estações meteorológicas localizadas em alguns municípios no estado do Paraná (Figura 1) pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Quando necessário converter a velocidade do vento (u) medida para uma altura inferior a 10 metros, foi usada a Equação 1:

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

onde, u_z é a velocidade do vento medida a 10 metros e, z é a altura em que a velocidade do vento foi medida (10 metros).



Figura 1. Localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo em regiões climáticas do Paraná de acordo com Alvares et al. (2013)

Foram avaliados na escala diária 32 métodos de estimativa de ETo (Tabela 1) que compreendem três categorias: métodos aerodinâmicos, métodos baseados na temperatura e métodos baseados na radiação.

Tabela 1. Métodos de ETo aerodinâmicos (A), baseados na temperatura do ar (T) e na radiação (R) avaliados neste estudo.

	Método	Equação	Referência
A	Trabert	$ET_o = 0,3075 \cdot \sqrt{u_2} (e_s - e_a)$	Tabari et al.(2013)
A	Albrecht	$ET_o = (0,1005 + 0,297 \cdot u_2) \cdot (e_s - e_a)$	Yang et al.(2021)
A	Meyer	$ET_o = (0,375 + 0,05026 \cdot u_2) \cdot (e_s - e_a)$	Tabari et al.(2013)
A	Brockamp-Wenner	$ET_o = 0,543 \cdot u_2^{0,456} \cdot (e_s - e_a)$	Yang et al.(2021)
A	Rohwer	$ET_o = 0,44 \cdot (1 + 0,27 \cdot u_2) \cdot (e_s - e_a)$	Yang et al.(2021)
A	WMO 1966	$ET_o = (0,1298 + 0,0934 \cdot u_2) \cdot (e_s - e_a)$	Tabari et al.(2013)
A	Mahringer	$ET_o = 0,15072 \cdot \sqrt{3,6 \cdot u_2} \cdot (e_s - e_a)$	Tabari et al.(2013)
A	Harbeck	$ET_o = 0,0578 \cdot u_8 (e_s - e_a) \cdot 25,4$	Yang et al.(2021)
T	Schendel	$ET_o = 16 \cdot \frac{T}{UR}$	Tabari et al.(2013)
T	Hargreaves-Samani-1	$ET_o = 0,408 \cdot 0,0030(T + 20)(T_{mx} - T_{mn})^{0,4} R_o$	Droogers; Allen(2002)
T	Hargreaves-Samani-2	$ET_o = 0,408 \cdot 0,0025(T + 16,8)(T_{mx} - T_{mn})^{0,5} R_o$	Droogers; Allen(2002)
T	Hargreaves-Samani-3	$ET_o = 0,408 \cdot 0,0023(T + 17,8)(T_{mx} - T_{mn})^{0,424} R_o$	Trajkovic (2007)
T	Baier-Robertson	$ET_o = 0,157 \cdot T_{mx} + 0,158(T_{mx} - T_{mn}) + 0,109 \cdot R_o - 5,39$	Yang et al.(2021)
T	Romanenko	$ET_o = 4,5 \left(1 + \frac{T}{25}\right)^2 \left(1 - \frac{e_a}{e_s}\right)$	Tanaka et al.(2016)
T	Valiantzas-1	$ET_o = 0,0118 \left(1 - \frac{UR}{100}\right)^{0,2} (T_{mx} - T_{mn})^{0,3} (R_o \sqrt{T + 10} - 40) + 0,1(T + 20) \left(1 - \frac{UR}{100}\right)$	Souza et al.(2022)
T	Camargo	$ET_o = 0,408 \cdot F \cdot R_o \cdot T$	Araújo et al.(2012)
T	Camargo modificado	$ET_o = 0,408 \cdot F \cdot R_o \cdot \{0,36[3 \cdot (T_{mx} - T_{mn})]\}$	Araújo et al.(2012)
R	Turc	$ET_o = 0,013 \left(\frac{T}{T+15}\right) (R_g + 50) \left(1 + \frac{50-UR}{70}\right) p /$ UR<50% $ET_o = 0,013 \left(\frac{T}{T+15}\right) (R_g + 50) p /$ UR≥50%	Yang et al.(2021)
R	Jensen-Haise	$ET_o = (0,014 \cdot T - 0,37) (R_g \cdot 0,000673) \cdot 25,4$	Yang et al.(2021)
R	Stephens-Stewart	$ET_o = (0,0082 \cdot T - 0,19) \left(\frac{R_g}{1500}\right) \cdot 25,4$	Yang et al.(2021)
R	Hargreaves	$ET_o = 0,0135 \cdot R_g \frac{(T + 17,8)}{\lambda}$	Yang et al.(2021)
R	Milly-Dunne	$ET_o = 0,8 \frac{(R_N - G)}{\lambda}$	Yang et al.(2021)
R	Priestley-Taylor	$ET_o = 1,26 \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta - \gamma}\right) \left(\frac{R_N - G}{\lambda}\right)$	Yang et al.(2021)
R	Makkink	$ET_o = 0,61 \cdot (0,483 + 0,01 \cdot T) \cdot R_g - 0,12$	Souza et al.(2022)
R	Irmak	$ET_o = -0,611 + 0,149 \cdot R_g + 0,079 \cdot T$	Tabari et al.(2013)
R	Ritchie	$ET_o = \alpha[(3,87 \cdot 10^{-3}) \cdot R_g(0,6 \cdot T_{mx} + 0,4 \cdot T_{mn} + 29)]$	Tabari et al.(2013)
R	Tanner-Pelton	$ET_o = 0,457 \cdot R_n - 0,11$	Silva et al.(2018)
R	Hicks-Hess	$ET_o = \frac{R_N}{\lambda} \left(\frac{\Delta}{0,9\Delta + 0,63\gamma}\right)$	Silva et al.(2018)
R	Tabari	$ET_o = -0,478 + 0,156 \cdot R_g - 0,0112 \cdot T_{mx} + 0,0773 \cdot T_{mn}$	Souza et al.(2022)
R	Souza-Silva	$ET_o = -0,00728 + 1,356325 \cdot (e_s - e_a) + 0,174658 \cdot R_g$	Souza et al.(2022)
R	Valiantzas-2	$ET_o = 0,0393 \cdot R_g \cdot \sqrt{T + 9,5} - 0,19 \cdot R_g^{0,6} \cdot \phi^{0,15} + 0,078(T + 20) \left(1 - \frac{UR}{100}\right)$	Souza et al.(2022)
R	Valiantzas-3	$ET_o = 0,0393 \cdot R_g \cdot \sqrt{T + 9,5} - 2,4 \left(\frac{R_g}{R_o}\right)^2 + Cu(T + 20) \left(1 - \frac{UR}{100}\right)$	Souza et al.(2022)

Nota: u_2 e u_8 é a velocidade do vento a 2m e 8m de altura, respectivamente, em $m \cdot s^{-1}$; e_s e e_a é a pressão de saturação do vapor d'água e pressão real do vapor d'água, respectivamente, em hPa, exceto no método de Rower, em mmHg e de Souza-Silva, em Pat., T_{mn} , T_{mx} é a temperatura média, mínima e máxima do ar, em °C; UR é a umidade relativa do ar, em %; R_o é a radiação solar extraterrestre, em $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$; λ é o calor latente de evaporação, igual a $2,45 MJ \cdot Kg^{-1}$; ρ é a densidade da água, em $Kg \cdot m^{-3}$; F é o fator de ajuste, baseado na temperatura média anual; R_g é a radiação solar, em $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$, exceto nos métodos de Turc, de Jensen-Haise e de Stephens-Stewart, em $cal \cdot cm^{-2} \cdot dia^{-1}$ e no método de Makkink, em $mm \cdot dia^{-1}$; R_n é a radiação líquida, em $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$; G é o fluxo de calor no solo, em $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$, que será desconsiderado na escala diária e decendial; Δ é a declividade da curva de pressão do vapor d'água, em $KPa \cdot ^\circ C^{-1}$; ϕ é a latitude, em graus, $Cu=0,054$ quando $UR>65\%$ e $Cu=0,083$, quando $UR<65\%$; e γ é a constante psicrométrica, em $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$, que varia em função da altitude (Allen et al., 1998).

F=0,01 para $T<23^\circ C$; F=0,0105 para $T=24^\circ C$; F=0,011 para $T=25^\circ C$; F=0,0115 para $T=26^\circ C$; e F=0,012 para $T>26^\circ C$

$\alpha=1,1$; para $5^{\circ}\text{C}<T_{\text{mx}}\leq 35^{\circ}\text{C}$
 $\alpha=1,1+0,05(T_{\text{mx}}-35)$; para $T_{\text{mx}}>35^{\circ}\text{C}$

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237,2)^2}$$

$G_i=0,07 \cdot (T_{i+1}-T_{i-1})$; fluxo de calor no solo para o mês i

A validação da estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) pelos 32 métodos foi realizada com a aplicação dos seguintes indicadores: erro quadrático médio (EQM); erro médio (EM); coeficiente de determinação (R²) e de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de confiança (c). O método de Penman-Monteith (PM FAO-98) (Equação 2) foi considerado como padrão.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \frac{\gamma \cdot 900 \cdot u_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (2)$$

O Índice de concordância (d) (Equação 3) descrito por Willmott (1981), oscila de 0 a 1, onde, a concordância perfeita é representada por valores iguais a 1. O índice indicará o quanto os valores de ET_o estimados se ajustam aos valores obtidos por PM FAO-98.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|Y_i - \bar{Y}| + |X_i - \bar{X}|)^2} \right] \quad (3)$$

onde, X_i= são valores de ET_o estimados pelos métodos a serem avaliados; $\bar{X}$ = são as médias de ET_o estimadas pelos métodos a serem avaliados; Y_i= são valores de ET_o estimados por PM FAO-98 e N= é o número de dados da série de ET_o.

Com intuito de analisar a confiabilidade da ET_o estimada pelos métodos, foi calculado o índice de confiança (c) descrito por Camargo e Sentelhas (1997), na Equação 4.

$$c = r \cdot d \quad (4)$$

Os resultados do índice de confiança foram interpretados de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2. Interpretação do índice de confiança de Camargo e Sentelhas (1997).

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 0,50	Mau
≤0,40	Péssimo

O erro quadrático médio da estimativa (EQM) foi calculado conforme a Equação 5, considerando a soma da diferença das ET_o estimadas pelos métodos com as obtidas por PM FAO-98, onde N, representa o número de dados de ET_o.

$$EQM = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{N-1} \right)^{1/2} \quad (5)$$

O erro médio (EM) representa a diferença entre as médias de ET_o, estimada pelos métodos e

a ET_o obtida por PM FAO-98, indicando uma tendência da ET_o estimada pelos métodos em subestimar (EM<0) e superestimar (EM>0) os dados de ET_o padrão, conforme a Equação 6.

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)}{N} \quad (6)$$

Resultados e discussão

Recorrendo aos valores do índice de confiança, a Tabela 3 mostra que os melhores

desempenhos foram atribuídos aos métodos baseados na radiação, na contrapartida aos aerodinâmicos. Salvo de Turc, Tanner-Pelton e de Valiantzas-1 em alguns municípios, os demais métodos baseados na radiação foram unânimes em apresentar um desempenho ‘muito bom’ ou ‘ótimo’ na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) diária em todos os municípios paranaenses analisados. Tabari (2010) ao avaliar

quatro métodos para diferentes regiões climáticas do Irã (Makkink, Turc, Priestley-Taylor e Hargreaves), indicou o de Turc como o mais adequado na estimativa de ET_o em clima frio-úmido e árido. Enquanto o de Hargreaves foi o mais preciso nas regiões com clima quente-úmido e semi-árido, atestando a importância em realizar estudos neste contexto em regiões com diferentes climas como no Paraná.

Tabela 3. Avaliação diária da ET_o estimada por 32 métodos usados neste estudo para os municípios de Marechal Cândido Rondon, Dois Vizinhos, Inácio Martins, Castro, Morretes e Maringá.

	Marechal Cândido Rondon						Dois Vizinhos					
	EQM	d	EM	r	c	R ²	EQM	d	EM	r	c	R ²
Trabert	2,64	0,91	-2,01	0,68	Mediano	0,47	3,07	0,80	-2,43	0,50	Péssimo	0,25
Albrecht	3,54	0,91	0,17	0,63	Sofrível	0,40	2,81	0,88	-1,50	0,46	Péssimo	0,21
Meyer	2,32	0,93	-1,76	0,74	Bom	0,55	2,61	0,88	-1,85	0,53	Mau	0,28
Brockamp	2,71	0,94	0,01	0,69	Mediano	0,48	2,54	0,91	-1,09	0,50	Mau	0,25
Rohwer	2,27	0,94	-1,47	0,72	Bom	0,51	2,59	0,88	-1,80	0,53	Mau	0,28
WMO-66	3,11	0,85	-2,67	0,67	Sofrível	0,45	3,38	0,71	-2,86	0,51	Péssimo	0,26
Mahringer	2,46	0,92	-2,05	0,77	Bom	0,59	2,61	0,88	-1,83	0,52	Mau	0,27
Harbeck	4,59	0,44	-4,22	0,61	Péssimo	0,37	4,40	0,26	-3,93	0,43	Péssimo	0,18
Schendel	1,79	0,97	0,43	0,68	Bom	0,46	2,18	0,95	0,53	0,45	Mau	0,20
HS-1	1,51	0,98	-0,28	0,71	Bom	0,50	1,67	0,97	0,06	0,62	Sofrível	0,38
HS-2	1,45	0,98	-0,35	0,75	Bom	0,56	1,63	0,97	-0,03	0,64	Mediano	0,41
HS-3	2,01	0,95	-1,33	0,72	Bom	0,52	1,90	0,95	-0,94	0,62	Sofrível	0,39
Baier-Rob	1,38	0,98	-0,26	0,77	Muito Bom	0,59	1,63	0,97	-0,04	0,65	Mediano	0,42
Romanenko	1,76	0,97	-0,13	0,78	Muito Bom	0,60	2,32	0,94	-0,14	0,53	Mau	0,28
Camargo	2,40	0,93	-1,49	0,49	Mau	0,24	2,29	0,92	-1,19	0,42	Péssimo	0,18
Camargo mod	3,42	0,78	-3,06	0,83	Mediano	0,69	3,09	0,78	-2,58	0,69	Sofrível	0,48
Turc	2,32	0,92	-2,19	0,97	Ótimo	0,94	2,20	0,91	-1,95	0,91	Muito Bom	0,83
Jensen-Hai	2,61	0,96	2,10	0,93	Ótimo	0,86	2,48	0,96	1,92	0,96	Ótimo	0,93
Stephens-Stew	1,13	0,99	-0,80	0,93	Ótimo	0,86	0,86	0,99	-0,64	0,96	Ótimo	0,93
Hargreaves	1,24	0,98	-0,94	0,93	Ótimo	0,86	0,96	0,99	-0,75	0,96	Ótimo	0,92
Milly-Dunne	1,07	0,99	0,68	0,94	Ótimo	0,88	1,12	0,99	0,81	0,97	Ótimo	0,94
Priestley-Taylor	1,28	0,99	0,98	0,96	Ótimo	0,92	1,30	0,99	1,01	0,98	Ótimo	0,97
Irmak	1,55	0,97	-1,12	0,93	Ótimo	0,86	1,22	0,98	-0,80	0,96	Ótimo	0,92
Ritchie	1,13	0,99	-0,81	0,93	Ótimo	0,87	0,86	0,99	-0,64	0,96	Ótimo	0,93
Tanner-Pelton	3,17	0,95	2,79	0,93	Ótimo	0,87	3,22	0,93	2,74	0,97	Ótimo	0,94
Hicks-Hess	1,16	0,99	0,85	0,96	Ótimo	0,91	1,19	0,99	0,91	0,98	Ótimo	0,96
Souza-Silva	1,15	0,99	-0,96	0,99	Ótimo	0,97	0,90	0,99	-0,70	0,99	Ótimo	0,97
Valiantzas-1	1,39	0,98	-0,83	0,85	Muito Bom	0,73	1,65	0,96	-0,56	0,68	Mediano	0,46
Valiantzas-2	1,80	0,96	-1,68	0,98	Ótimo	0,96	1,61	0,96	-1,46	0,97	Ótimo	0,95
Valiantzas-3	0,98	0,99	-0,70	0,95	Ótimo	0,91	0,95	0,99	-0,50	0,93	Ótimo	0,86
Tabari	2,00	0,95	-1,61	0,89	Muito Bom	0,80	1,62	0,96	-1,27	0,94	Ótimo	0,87
Makkink	2,46	0,96	2,07	0,93	Ótimo	0,86	2,43	0,96	2,01	0,97	Ótimo	0,93
	Inácio Martins						Castro					
	EQM	d	EM	r	c	R ²	EQM	d	EM	r	c	R ²
Trabert	3,25	0,49	-2,90	0,60	Péssimo	0,36	2,62	0,55	-2,08	0,64	Péssimo	0,41

Albrecht	2,86	0,56	-2,42	0,57	Péssimo	0,32	2,31	0,61	-1,66	0,56	Péssimo	0,31
Meyer	2,90	0,54	-2,59	0,72	Péssimo	0,52	2,25	0,60	-1,69	0,71	Mau	0,51
Brockamp	2,67	0,60	-2,22	0,61	Péssimo	0,37	1,92	0,68	-1,23	0,65	Mau	0,42
Rohwer	2,89	0,55	-2,57	0,70	Péssimo	0,49	2,25	0,60	-1,69	0,69	Mau	0,48
WMO-66	3,45	0,47	-3,11	0,65	Péssimo	0,42	2,90	0,52	-2,38	0,64	Péssimo	0,41
Mahringer	2,88	0,54	-2,57	0,74	Péssimo	0,54	2,19	0,61	-1,63	0,73	Mau	0,53
Harbeck	4,04	0,40	-3,65	0,52	Péssimo	0,27	3,56	0,45	-3,03	0,50	Péssimo	0,25
Schendel	1,50	0,70	-0,49	0,63	Mau	0,39	1,51	0,72	0,42	0,68	Mau	0,47
HS-1	1,40	0,77	-0,03	0,64	Mau	0,41	1,50	0,80	0,88	0,79	Mediano	0,62
HS-2	1,34	0,79	-0,19	0,68	Sofrível	0,46	1,40	0,83	0,77	0,80	Bom	0,65
HS-3	1,67	0,67	-0,93	0,65	Mau	0,42	1,29	0,80	-0,08	0,79	Mediano	0,62
Baier-Rob	1,43	0,80	-0,42	0,68	Sofrível	0,46	1,47	0,83	0,77	0,76	Mediano	0,58
Romanenko	2,07	0,71	-1,67	0,74	Sofrível	0,55	1,42	0,80	-0,49	0,73	Sofrível	0,53
Camargo	2,19	0,52	-1,42	0,40	Péssimo	0,16	1,72	0,66	-0,67	0,58	Péssimo	0,34
Camargo mod	2,74	0,53	-2,37	0,80	Mau	0,64	2,12	0,60	-1,52	0,77	Mau	0,59
Turc	2,31	0,65	-2,13	0,94	Mediano	0,88	1,85	0,74	-1,60	0,97	Bom	0,94
Jensen-Hai	2,06	0,82	1,73	0,96	Muito Bom	0,93	1,88	0,87	1,47	0,99	Ótimo	0,97
Stephens-Stew	0,77	0,95	-0,57	0,96	Ótimo	0,93	0,59	0,98	-0,47	0,99	Ótimo	0,97
Hargreaves	0,89	0,93	-0,68	0,96	Ótimo	0,92	0,68	0,96	-0,52	0,98	Ótimo	0,97
Milly-Dunne	1,33	0,90	1,17	0,98	Ótimo	0,95	0,93	0,96	0,73	0,99	Ótimo	0,98
Priestley-Taylor	1,37	0,90	1,22	0,99	Ótimo	0,98	1,05	0,95	0,82	1,00	Ótimo	0,99
Irmak	1,03	0,88	-0,68	0,96	Muito Bom	0,92	0,85	0,93	-0,42	0,98	Ótimo	0,96
Ritchie	0,69	0,96	-0,46	0,97	Ótimo	0,93	0,50	0,98	-0,35	0,99	Ótimo	0,98
Tanner-Pelton	3,42	0,67	3,09	0,97	Mediano	0,95	2,68	0,79	2,21	0,99	Muito Bom	0,98
Hicks-Hess	1,29	0,91	1,16	0,99	Ótimo	0,98	0,97	0,95	0,76	1,00	Ótimo	0,99
Souza-Silva	0,79	0,94	-0,62	0,99	Ótimo	0,98	0,65	0,96	-0,41	1,00	Ótimo	0,99
Valiantzas-1	1,51	0,77	-1,06	0,82	Mediano	0,67	1,14	0,86	-0,05	0,84	Bom	0,70
Valiantzas-2	1,75	0,77	-1,64	0,98	Muito Bom	0,95	1,39	0,85	-1,22	0,98	Muito Bom	0,97
Valiantzas-3	0,96	0,92	-0,67	0,94	Ótimo	0,87	0,62	0,97	-0,23	0,97	Ótimo	0,95
Tabari	1,33	0,82	-1,01	0,94	Muito Bom	0,89	1,20	0,87	-0,87	0,96	Muito Bom	0,91
Makkink	2,28	0,79	2,05	0,97	Muito Bom	0,94	2,00	0,85	1,71	0,99	Muito Bom	0,98
	Morretes						Maringá					
	EQM	d	EM	r	c	R ²	EQM	d	EM	r	c	R ²
Trabert	3,30	0,48	-2,83	0,55	Péssimo	0,30	2,77	0,91	-2,45	0,80	Bom	0,63
Albrecht	3,17	0,50	-2,68	0,51	Péssimo	0,26	2,1	0,96	-1,05	0,76	Bom	0,58
Meyer	2,81	0,54	-2,33	0,67	Péssimo	0,45	2,25	0,95	-1,86	0,81	Muito Bom	0,66
Brockamp	2,86	0,54	-2,35	0,56	Péssimo	0,31	1,84	0,97	-0,32	0,80	Muito Bom	0,64
Rohwer	2,86	0,53	-2,39	0,65	Péssimo	0,43	2,17	0,95	-1,75	0,81	Muito Bom	0,66
WMO-66	3,40	0,47	-2,92	0,61	Péssimo	0,37	3,52	0,81	-3,24	0,80	Mediano	0,63
Mahringer	2,69	0,56	-2,22	0,69	Péssimo	0,47	2,28	0,94	-1,90	0,81	Muito Bom	0,66
Harbeck	3,85	0,42	-3,34	0,43	Péssimo	0,19	5,18	0,34	-4,82	0,73	Péssimo	0,54
Schendel	1,67	0,65	0,58	0,63	Péssimo	0,40	1,79	0,98	0,71	0,74	Bom	0,54
HS-1	1,71	0,75	0,78	0,64	Mau	0,40	1,89	0,97	-0,86	0,61	Sofrível	0,38
HS-2	1,60	0,78	0,63	0,67	Sofrível	0,44	1,89	0,97	-0,98	0,65	Mediano	0,43
HS-3	1,51	0,74	-0,20	0,64	Mau	0,41	2,54	0,93	-1,90	0,63	Sofrível	0,39
Baier-Rob	1,66	0,78	0,66	0,65	Mediano	0,43	1,87	0,97	-0,97	0,66	Mediano	0,44
Romanenko	2,00	0,69	-1,39	0,68	Mau	0,47	1,92	0,98	0,44	0,81	Muito Bom	0,66

Camargo	1,79	0,65	-0,18	0,46	Péssimo	0,21	2,63	0,92	-1,84	0,49	Mau	0,24
Camargo mod	2,45	0,57	-1,93	0,73	Mau	0,53	4,09	0,7	-3,71	0,75	Sofrível	0,57
Turc	2,21	0,66	-1,92	0,95	Mediano	0,91	2,24	0,94	-2,13	0,96	Ótimo	0,93
Jensen-Hai	2,48	0,81	2,03	0,98	Muito Bom	0,96	2,65	0,96	2,22	0,94	Ótimo	0,88
Stephens-Stew	0,44	0,99	-0,22	0,98	Ótimo	0,96	1,2	0,99	-0,93	0,94	Ótimo	0,88
Hargreaves	0,51	0,98	-0,29	0,98	Ótimo	0,96	1,35	0,98	-1,08	0,93	Ótimo	0,87
Milly-Dunne	0,94	0,95	0,80	0,99	Ótimo	0,99	0,85	1	0,66	0,97	Ótimo	0,95
Priestley-Taylor	1,13	0,94	0,95	1,00	Ótimo	1,00	1,24	0,99	1,09	0,98	Ótimo	0,97
Irmak	0,83	0,93	-0,22	0,97	Ótimo	0,95	1,76	0,97	-1,37	0,94	Ótimo	0,88
Ritchie	0,44	0,99	-0,17	0,98	Ótimo	0,96	1,29	0,98	-1,03	0,94	Ótimo	0,88
Tanner-Pelton	2,77	0,78	2,38	0,99	Muito Bom	0,99	3,18	0,95	2,94	0,97	Ótimo	0,94
Hicks-Hess	1,03	0,95	0,88	1,00	Ótimo	1,00	1,07	0,99	0,93	0,98	Ótimo	0,97
Souza-Silva	0,81	0,94	-0,59	0,99	Ótimo	0,99	1,21	0,99	-1,05	0,99	Ótimo	0,98
Valiantzas-1	1,51	0,77	-0,64	0,73	Sofrível	0,53	1,49	0,98	-1,01	0,87	Ótimo	0,76
Valiantzas-2	1,48	0,84	-1,33	0,98	Muito Bom	0,96	1,81	0,97	-1,71	0,98	Ótimo	0,97
Valiantzas-3	0,78	0,95	-0,37	0,95	Ótimo	0,90	1,02	0,99	-0,74	0,95	Ótimo	0,91
Tabari	1,06	0,89	-0,60	0,96	Ótimo	0,93	2,16	0,95	-1,81	0,92	Ótimo	0,84
Makkink	2,41	0,81	2,10	0,99	Muito Bom	0,97	2,43	0,97	2,12	0,94	Ótimo	0,89

EQM = erro quadrático médio; d = índice de concordância; EM = erro médio; r = coeficiente de correlação; c = índice de confiança; R² = coeficiente de determinação.

É compreensível o melhor desempenho dos métodos baseados na radiação, assim como encontrado em outros estudos (Tabari, 2010; Tabari et al., 2013; Bourleysikas et al., 2017; Macêdo et al., 2017) e atestado por Lemos Filho et al. (2010) que apesar de terem averiguado uma influência distinta das variáveis meteorológicas sobre a ETo entre localidades de Minas Gerais, a radiação solar foi a mais influente na estimativa de ETo.

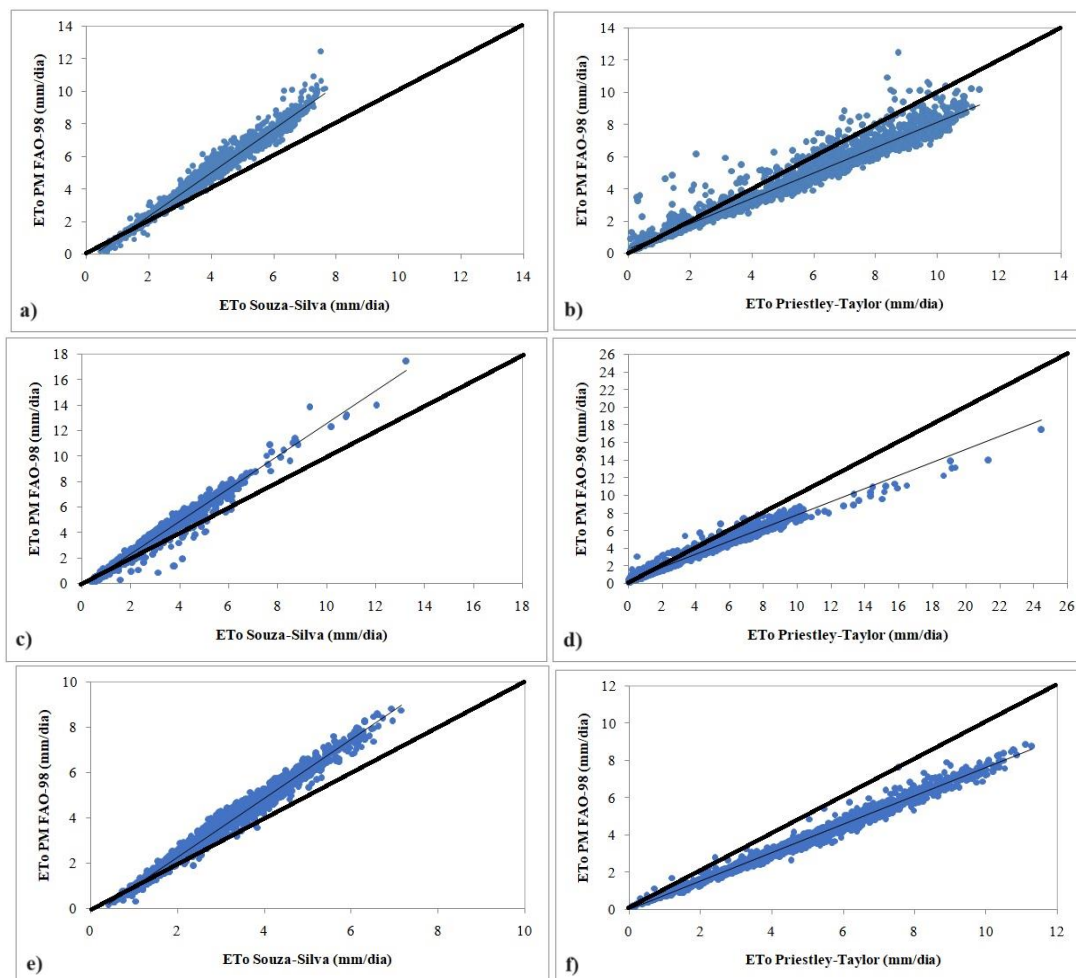
Quanto aos métodos aerodinâmicos e, ou, baseados na temperatura do ar, apenas em Marechal Cândido Rondon e Maringá, houve métodos com desempenhos passíveis de serem usados como alternativa para estimativa diária da ETo na ausência de dados de radiação. Nesses municípios, como exemplo, o método de Romanenko apresentou uma variação na estimativa de 1,76 a 1,92 mm.dia⁻¹ (EQM), apesar da ETo por Penman-Monteith (PM FAO-98) ter explicado apenas de 60% a 66% (R²=0,60 e 0,66) da variação de ETo estimada por Romanenko. Em Maringá, além de todos os métodos baseados na radiação terem apresentados um ‘ótimo’ desempenho, foi o único a ter resultados relativamente satisfatórios para alguns métodos aerodinâmicos, como o de Brockamp que teve o menor EQM e erro médio (EM), além de um R² (0,64) semelhante aos demais classificados com desempenho ‘muito bom’.

No geral, envolvendo todos os municípios do Estado e os respectivos R², a ETo de PM FAO-98 explicou mais de 80% da variação de ETo pelos métodos avaliados baseados na radiação, sendo apenas o método de Valiantzas-1 como exceção deste limiar. Em estudo realizado ao sul da província canadense de Otário, Sentelhas et al. (2010) ainda apresentaram a opção de calibrar localmente um dado método para melhorar a estimativa de ETo, como foi o caso com o de Priestley-Taylor. Mas Valipour (2015) mostrou que a calibração também pode ser aplicada a métodos aerodinâmicos para melhorar a estimativa. Morales-Salinas et al. (2017) afirmaram que após a calibração, a ETo fornecida pelo método de Hargreaves apresentou um erro de apenas 5% em relação a de PM FAO-98 na região centro sul do Chile. E no Brasil, Cunha et al. (2013) sugeriram que o método de Hargreaves-Samani somente pode ser usado no município de Chapadão do Sul, estado do Mato Grosso do Sul, após passar por uma calibração. Isso significa que apesar do desempenho insatisfatório dos métodos aerodinâmicos e baseados na temperatura no Paraná, ainda há a possibilidade de calibrá-los para seu uso na estimativa da ETo diária, principalmente pelos dados de radiação serem mais incomuns nas estações meteorológicas, no comparativo aos da temperatura do ar e umidade do ar.

Considerando o erro médio (EM), a tendência nas estimativas de ETo para os métodos baseados na radiação apresentaram uma diversidade unânime em todos os municípios paranaenses analisados, sendo 10 que tendem a subestimar (Turc, Stephens-Stew, Hargreaves, Irmak, Ritchie, Souza-Silva, Tabari, Valiantzas-1, 2 e 3) e seis em superestimar a ETo (Jensen-Hai, Milly-Dunne, Priestley-Taylor, Tanner-Pelton, Hicks-Hess e de Makkink). Tendência contrária foi encontrada para as estimativas feitas pelos métodos de Irmak e de Ritchie em regiões úmidas do Irã (Tabari et al., 2013) e no estado americano da Flórida (Irmak et al., 2003). No comparativo de ETo obtido por Hargreaves com PM FAO-98, Temesgen et al. (2005) explicaram que maiores velocidades do vento combinado com baixa umidade do ar resulta em subestimativas de ETo por Hargreaves. Tendência contrária se a velocidade do vento fosse baixa combinada com alta umidade do ar. Os autores explicam que esse comportamento distinto pode ser devido a falta de termos no método de Hargreaves relacionadas ao vento e umidade do ar. Uma associação dessas

combinações com o clima dos seis municípios do Paraná seria mais viável se as análises no presente estudo fossem sazonais, tendo em vista que, Maringá, por exemplo, possui uma estação relativamente mais seca. Talvez por isso, foi o município em que a tendência de subestimativa da ETo foi mais evidente, não somente por Hargreaves, mas como dos outros métodos baseados na radiação que estimaram valores em média, abaixo a de PM FAO-98.

A Figura 2 representa os gráficos de dispersão 1:1 da ETo estimada por PM FAO-98 com o método baseado na radiação dentre os que tenderam a subestimar (Souza-Silva) e superestimar (Priestley-Taylor) com maior R^2 , para cada município usado no estudo. Algo em comum entre os dois métodos refere-se ao fato de que as referidas tendências são mais evidentes quanto maiores forem os valores estimados. A ETo pelo método de Souza-Silva nos municípios de Marechal Cândido Rondon (Figura 2a), Castro (Figura 2g) e de Maringá (Figura 2k) apresenta uma discreta tendência de superestimativa para valores inferiores em torno de 1 mm.dia^{-1} .



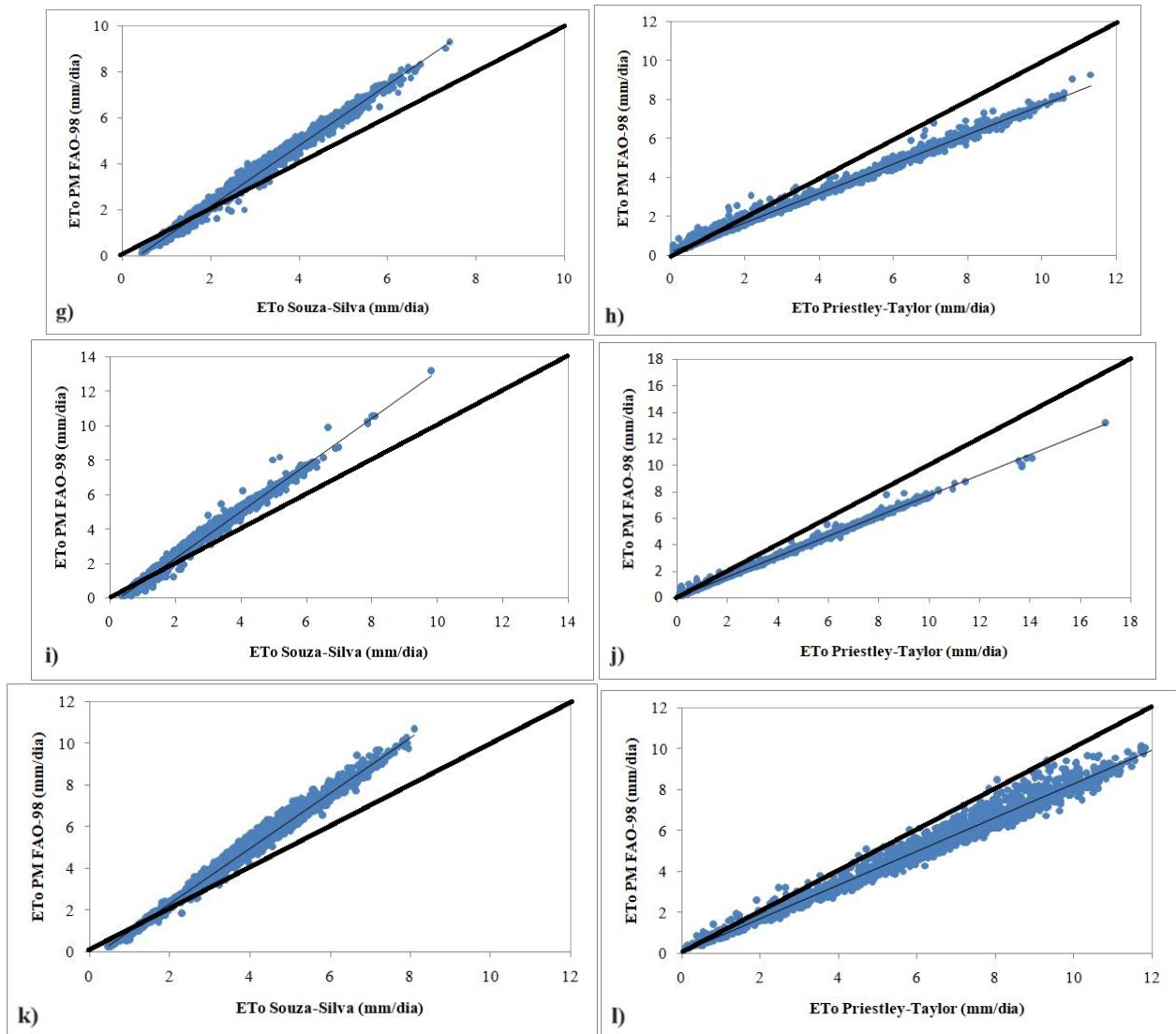


Figura 2. Gráficos de dispersão 1:1 entre a ETo diária ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$) padrão (PM FAO98) e o método de Souza-Silva e de Priestley-Taylor, respectivamente, para os municípios de Marechal Cândido Rondon (2a e 2b), Dois Vizinhos (2c e 2d), Inácio Martins (2e e 2f), Castro (2g e 2h), Morretes (2i e 2j) e Maringá (2k e 2l).

A Tabela 4 apresenta a classificação dos 32 métodos avaliados, baseada na média obtida entre os municípios do erro quadrático médio (EQM), onde se tem os métodos baseados na radiação ocupando as dez primeiras posições, com o de Ritchie apresentando para o Estado uma variação média na estimativa da ETo de $0,82 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ em relação a ETo de PM FAO-98. Apesar destes valores médios do EQM atestarem o desempenho satisfatório dos métodos baseados na radiação para o Paraná, o coeficiente de variação (CV) indica que a dispersão dos dados entre os seis municípios do Estado foi bem

distinto, como exemplo, o comparativo entre o de Ritchie e Hicks-Hess que foram classificados em 1º e 7º lugar, tendo CV de 41,3% e 10,4%, respectivamente. Isto significa que a ETo obtida por Ritchie teve EQM elevados (acima de $1,0 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$) como em Maringá e Marechal Cândido Rondon e baixos (inferior a $0,5 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$) como em Morretes e Castro. Enquanto a ETo por Hicks-Hess a variação do EQM entre os seis municípios foi relativamente baixa, sendo de 0,97 a $1,29 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$.

Tabela 4. Média e coeficiente de variação (CV) do EQM entre os municípios do Paraná usados no estudo da ETo diária estimada pelos 32 métodos aerodinâmicos (A), baseados na temperatura do ar (A) e na radiação (R).

Classificação	Método	Categoria	Média	CV
1	Ritchie	R	0,82	41,3
2	Stephens-Stew	R	0,83	35,7
3	Valiantzas-3	R	0,88	17,4
4	Souza-Silva	R	0,92	23,7
5	Hargreaves	R	0,94	34,0
6	Milly-Dunne	R	1,04	16,6
7	Hicks-Hess	R	1,12	10,4
8	Irmak	R	1,21	31,6
9	Priestley-Taylor	R	1,23	9,4
10	Valiantzas-1	R	1,45	12,0
11	Hargreaves-Samani -2	T	1,55	12,9
12	Tabari	R	1,56	28,6
13	Baier-Rob	T	1,57	11,7
14	Hargreaves-Samani -1	T	1,61	11,0
15	Valiantzas-2	R	1,64	10,7
16	Schendel	T	1,74	14,3
17	Hargreaves-Samani -3	T	1,82	24,1
18	Romanenko	T	1,91	16,0
19	Camargo	T	2,17	16,4
20	Turc	R	2,19	7,9
21	Makkink	R	2,33	7,4
22	Jensen-Hai	R	2,36	13,4
23	Brockamp	A	2,42	17,8
24	Rohwer	A	2,51	12,8
25	Mahringer	A	2,52	10,3
26	Meyer	A	2,52	11,6
27	Albrecht	A	2,80	19,0
28	Trabert	A	2,94	10,3
29	Camargo mod	T	2,98	23,8
30	Tanner-Pelton	R	3,07	9,3
31	WMO-66	A	3,29	7,2
32	Harbeck	A	4,27	13,5

Apesar dos resultados mostrarem que há um bom número de opções para estimativa confiável de ETo nas escalas diária em substituição a PM FAO-98, ainda há possibilidade de melhorar as suas estimativas e, ou, com aqueles métodos que não apresentaram uma boa eficiência, realizando calibração local, conforme recomendado por Fooladmand e Haghighat (2007) e Sharafi e Ghaleni (2021) após estudos aplicados para diferentes regiões climáticas do Irã. Fooladmand e Haghighat (2007) especificam que para o método de Hargreaves, diferentes coeficientes devem ser usados para cada mês e

anualmente. O método de Hargreaves também obteve significativas melhoras nas estimativas após calibração feita por Ravazzani et al. (2012a, b) em duas bacias localizadas na Itália e na Suíça. Porém, Silva et al. (2018) atentam que nem sempre a calibração dos modelos resulta em melhora na estimativa, ao menos daqueles baseados na temperatura do ar, como no estudo feito para o município de Jaíba, estado de Minas Gerais.

Mártir et al. (2011) sugeriram a aplicação de diferentes abordagens entre estações

meteorológicas para estimar a ETo quando há ausência de dados para sua estimativa, como regressão linear e redes neurais. Para períodos menores que 10 dias, os melhores resultados de ETo a ser usada no preenchimento foi para a média oriunda das observações de ETo do dia anterior e posterior daquele a ser preenchido.

Mesmo que na eventualidade em dado município do Paraná usado neste estudo, não houver registros de radiação e, ou, algum dos métodos aerodinâmicos ou baseados na temperatura não tenha apresentado desempenho satisfatório, pode-se usar PM FAO-98 estimando alguma das variáveis necessárias. Nas condições climáticas no estado do Espírito Santo, Venancio et al. (2019) encontraram que na ausência de velocidade do vento, o método de PM FAO-98 pode ser usado para todas as escalas de tempo analisadas no estudo, considerando as recomendações do boletim nº 56 da FAO (Allen et al., 1998) para estimar a velocidade do vento. Nas condições semi-áridas no estado americano do Novo México, a equação de PM FAO-98 mostrou boa performance com dados ausentes de radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento. No entanto, quando houve ausência de mais um dado meteorológico, a estimativa por PM FAO-98 tendeu a subestimar a ETo (Djaman et al., 2019).

Outra opção para obtenção da ETo foi apresentada recentemente por Srivastava et al. (2020) ao sugerirem que os valores fornecidos pela NASA/POWER e o modelo WRF (Weather Research and Forecasting) podem ser usados para a estimativa, especialmente em áreas sem medições. No entanto, recomendam os dados da NASA/POWER em função dos cálculos de ETo serem menos dispendiosos computacionalmente e facilmente disponíveis do que as simulações realizadas pelo modelo WRF.

Conclusões

Os métodos fundamentados na radiação são indicados para estimar a evapotranspiração de referência diária, como o de Ritchie, Stephens-Stew, Valiantzas-3, Souza-Silva e Hargreaves que tiveram um ‘ótimo’ desempenho nos seis municípios paranaenses e os menores erros quadrático médios.

Na ausência de dados de radiação, devido a baixa eficácia dos métodos aerodinâmicos e baseados na temperatura do ar, recomenda-se estudos prévios aos seus usos, realizando calibração local e, ou, alternativas para estimar alguns dados meteorológicos necessários para aplicação do método de PM FAO-98.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de Iniciação Científica a primeira autora.

Referências

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Rome: FAO, 297 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.D.M., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22, 711-728.
- Amirashayeri, A., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V., Attar, N.F., 2023. Evapotranspiration estimation using hybrid and intelligent methods. *Soft Computing*, 27, 9801-9821.
- Araújo, W.F., Conceição, M.A.F., Venâncio, J.B., 2012. Evapotranspiração de referência diária em Boa Vista (RR) com base na temperatura do ar. *Irriga*, 1, 155-169.
- Bourletsikas, A., Argyrokastritis, I., Proutsos, N., 2017. Comparative evaluation of 24 reference evapotranspiration equations applied on ever green-broadleaved forest. *Hydrology Research*, nh2017232.
- Camargo, A.P., Sentelhas, P.C., 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5, 89-97.
- Cunha, F.F., Magalhães, F.F., Castro, M.A., 2013. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul – MS. *Engenharia na Agricultura*, 21, 159-172.
- Djaman, K., O'Neill, M., Diop, L., Bodian, A., Allen, S., Koudahe, K., Lombard, K., 2019. Evaluation of the Penman-Monteith and other 34 reference evapotranspiration equations under limited data in a semiarid dry climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 729-743.
- Droogers, P., Allen, R.G., 2002. Estimating reference evapotranspiration under in accurate data conditions. *Irrigation and Drainage Systems*, 16, 33-45.
- Fooladmand, H.R., Haghighat, M., 2007. Spatial and temporal calibration of Hargreaves equation for calculating monthly ETo based on Penman-Monteith method. *Irrigation and Drainage*, 56, 439-449.
- Gao, F., Feng, G., Ouyang, Y., Wang, H., Fisher, D., Adeli, A., Jenkins, J., 2017. Evaluation of reference evapotranspiration methods in arid, semiarid, and humid regions. *Journal of the*

- American Water Resources Association, 53, 791–808.
- Irmak, S., Irmak, A., Allen, R.G., Jones, J.W., 2003. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 129, 336–347
- Kartal, V., 2024. Prediction of monthly evapotranspiration by artificial neural network model development with Levenberg–Marquardt method in Elazig, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 1-17.
- Lemos Filho, L.C.A.; Carvalho, L.G.; Evangelista, A.W.P.; Alves Júnior, J., 2010. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14, 1294-1303.
- Macêdo, K.G. de, Arraes, F.D.D., Oliveira, W.C. de, Lima Júnior, J.C. de, Araújo, Y.R., 2017. Estimativa da evapotranspiração de referência utilizando modelos com base na temperatura do ar e radiação solar global para o estado de Goiás. *Engenharia na Agricultura*, 25, 540-548.
- Martí, P., González-Altozano, P., Gasque, M., 2011. Reference evapotranspiration estimation without local climatic data. *Irrigation Science*, 29, 479–495.
- Morales-Salinas, L., Ortega-Farías, S., Riveros-Burgos, C., Neira-Román, J., Carrasco-Benavides, M., López-Olivari, R., 2017. Monthly calibration of Hargreaves–Samani equation using remote sensing and Topoclimatology in central-southern Chile. *International Journal of Remote Sensing*, 38, 7497–7513.
- 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, 52–63.
- Pereira, A.R., Sedyama, G.C., Villa Nova, N.A., 2013. Evapotranspiração. Campinas, Fundag. 323p.
- Ravazzani, G., Corbari, C., Morella, S., Gianoli, P., 2012a. Modified Hargreaves-Samani equation for the assessment of reference evapotranspiration in Alpine River basins. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 148, 7.
- Ravazzani, G., Corbari, C., Morella, S., Gianoli, P., Mancini, M., 2012b. Modified Hargreaves-Samani equation for the assessment of reference evapotranspiration in Alpine River Basins. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 138, 592–599.
- Sentelhas, P. C., Gillespie, T. J., Santos, E. A., 2010. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*, 97, 635-644.
- Sharafi, S., Ghaleini, M.M., 2021. Evaluation of multivariate linear regression for reference evapotranspiration modeling in different climates of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 143, 1409–1423.
- Silva, G.H., Dias, S.H.B., Ferreira, L.B., Santos, J.E.O., Cunha, F.F.da., 2018. Performance of different methods for reference evapotranspiration estimation in Jaíba, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22, 83-89.
- Souza, L.S.B. de, Silva, M.T.L., Alba, E., Moura, M.S.B. de, Cruz Neto, J.F. da, Souza, C.A.A. de, Silva, T.G.F da., 2022. New method for estimating reference evapotranspiration and comparison with alternative methods in a fruit-producing hub in the semi-arid region of Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 149, 593-602.
- Srivastava, P.K., Singh, P., Mall, R.K., Pradhan, R.K., Bray. M., Gupta, A., 2020. Performance assessment of evapotranspiration estimated from different data sources over agricultural landscape in Northern India. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 145–156.
- Tabari, H., 2010. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. *Water Resource Management*, 24, 2311–2337.
- Tabari, H., Grismer, M., Trajkovic, S., 2013. Comparative an alysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31, 107–117.
- Tanaka, A.A., Souza, A.P. de, Klar, A.E., Silva, A.C. da, Gomes, A.W.A., 2016. Evapotranspiração de referência estimada por modelos simplificados para o Estado do Mato Grosso. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51, 91-104.
- Temesgen, B., Eching, S., Davidoff, B., Frame, K., 2005. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 131, 73–84.
- Trajkovic, S., 2007. Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 133, 38–42.

- Valipour, M., 2015. Calibration of mass transfer-based models to predict reference crop evapotranspiration. *Applied Water Science*, 7, 625–635.
- Venancio, L.P., Cunha, F.F. da, Mantovani, E.C., Sedyama, G.C., Eugenio, F.C., Aleman, C.C., 2019. Penman-Monteith with missing data and Hargreaves-Samani for ETo estimation in Espírito Santo State, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23, 153-159.
- Yang, Y., Chen, R., Han, C., Liu, Z., 2021. Evaluation of 18 models for calculating potential evapotranspiration in different climatic zones of China. *Agricultural Water Management*, 244, 106545.
- Willmott, C.J., 1981. On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 184-194.