

Artigo

Avaliação na Estimativa da Evapotranspiração de Referência Diária e Decendial nas Condições Climáticas do Rio Grande do Sul

Tassiê Turcato¹ , Rosandro Boligon Minuzzi² ¹*Departamento de Agronomia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.*²*Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.*

Recebido em: 27 de Setembro de 2023 - Aceito em: 8 de Outubro de 2024

Resumo

Este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) nas escalas diária e decendial em sete municípios do Rio Grande do Sul. Foram utilizados dados meteorológicos diários de janeiro de 2015 a dezembro de 2020, para estimar 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, Souza-Silva, Valiantzas-3 e Hargreaves são indicados em todos os municípios para estimar a ET_o diária e decendial. Baseado no índice de confiança, todos tiveram um 'ótimo' desempenho e apresentaram uma variação na estimativa inferior a 1 mm e tendência em subestimar a ET_o. Na ausência de dados de radiação, há possibilidade de estimar a ET_o diária usando alguns métodos baseados na temperatura do ar, como o de Romanenko, apenas para o município de Bagé. Na escala decendial, pode-se recorrer ao método aerodinâmico de Brockamp, nos municípios de Bagé e do Rio Grande e nos métodos fundamentados na temperatura de Hargreaves-Samani 1 e 2 e de Baier-Rob em todos os municípios, exceto de Santa Rosa.

Palavras-chave: métodos empíricos, radiação, temperatura do ar.

Evaluation in Estimating of Daily and Ten-Day Reference Evapotranspiration in the Climatic Conditions in the State of Rio Grande do Sul, Brazil

Abstract

This study aimed to evaluate the performance of methods for estimating reference evapotranspiration (ET_o) on daily and ten-day period in seven cities in Rio Grande do Sul. Daily meteorological data from January 2015 to December 2020 were used to estimate 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, Souza-Silva, Valiantzas-3 and Hargreaves are recommended in all cities to estimate daily and ten-day ET_o. Based on the confidence index, all had an 'excellent' performance and presented a variation in the estimate of less than 1 mm and a tendency to underestimate the ET_o. In the absence of radiation data, it is possible to estimate daily ET_o using some methods based on air temperature, such as Romanenko, only for the city of Bagé. On the ten-day period, one can use the Brockamp aerodynamic method in the cities of Bagé and Rio Grande and the temperature-based methods of Hargreaves-Samani 1 and 2 and Baier-Rob in all cities, except Santa Rosa.

Keywords: empirical methods, radiation, air temperature.

1. Introdução

A perda de água na forma de vapor da superfície do solo por evaporação, combinada com a de uma cultura por transpiração é referida como evapotranspiração (ET) (Allen *et al.*, 1998). É um processo central no sistema climático, uma ligação entre os ciclos da água, energia e do carbono (Jung *et al.*, 2010). Kartal (2024) enfatiza que estimar de forma precisa a ET se faz importante para um bom planejamento de irrigação agrícola, para o manejo dos recursos hídricos e uma modelagem hidrológica eficientes, além de ser um importante indicador da mudança climática regional (Sörensson e Ruscica, 2018).

Pereira *et al.* (2013) apresentam o conceito, a definição e o histórico da evapotranspiração de referência (ET₀). Resumidamente, o termo ET₀ foi utilizado pela primeira vez no início da década de 1970, mas somente no boletim FAO-56 foi definido o conceito de ET₀ como sendo aquela de uma cultura hipotética, com altura fixa 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). Desde então, definiu-se a ET₀ padrão FAO, estimada pelo método de Penman-Monteith (PM FAO-56) como único teoricamente robusto para estimativas de ET₀ em qualquer condição climática, por isso, sendo usado para avaliar a eficácia de outros métodos de estimativa de ET₀ em qualquer escala de tempo, e até mesmo em substituição a medidas lisimétricas (Pereira *et al.*, 2013).

No entanto, muitas vezes a estimativa de ET₀ por PM FAO-56 é limitada, já que emprega um número grande de variáveis meteorológicas que nem sempre estão disponíveis, uma vez que algumas delas necessitam de instrumentos de alto custo para seu uso. Como alternativa, Araújo *et al.* (2012) afirmam que alguns métodos empíricos demandam uma quantidade menor de variáveis e podem fornecer estimativas confiáveis. Apesar de estudos avaliando métodos para estimativa de ET₀ em diferentes escalas do tempo (Tabari, 2010; Tagliafferi *et al.*, 2010; Alencar *et al.*, 2011; Rigoni *et al.*, 2013; Tabari *et al.*, 2013; Djaman *et al.*, 2015; Irmack, 2016; Bourletsikas *et al.*, 2017; Macêdo *et al.*, 2017; Monteiro *et al.*, 2017; Farzanpour *et al.*, 2019), as peculiaridades dos fatores climáticos de cada local exigem a avaliação destes métodos para maior eficácia na estimativa da ET₀.

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. Por isso, diante do exposto, este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho de 32 métodos para estimativa de ET₀ nas escalas diária e decenal em alguns municípios do Rio Grande do Sul.

2. Material e Métodos

Foram utilizados dados diários de temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento a

10 m de altura (u_{10}) e radiação solar (R_g), de janeiro de 2015 a dezembro de 2020, oriundos de sete estações meteorológicas localizadas em alguns municípios no estado do Rio Grande do Sul (Fig. 1) pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A u_{10} foi convertida para a altura de 2 m (u_2) com a aplicação da Eq. (1), conforme proposto por Allen *et al.* (1998).

$$u_2 = u_{10} \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)} \quad (1)$$

onde z é a altura em que a velocidade do vento foi medida (10 m).

Foram avaliados nas escalas diária e decenal 32 métodos de estimativa de ET₀ (Tabela 1) que compreendem três categorias: métodos aerodinâmicos, métodos baseados na temperatura e métodos baseados na radiação.

A validação da estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀) pelos 32 métodos foi realizada com a aplicação dos seguintes indicadores: erro quadrático médio (EQM); erro médio (EM); coeficiente de determinação (R^2) e de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de confiança (c). O método de Penman-Monteith (PM FAO-98) (Eq. (2)) foi considerado como padrão.

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta(Rn - G) + \frac{7,900 \cdot u_2(e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (2)$$

O Índice de concordância (d) (Eq. (3)) descrito por Willmott (1981), oscila de 0 a 1, onde, a concordância perfeita

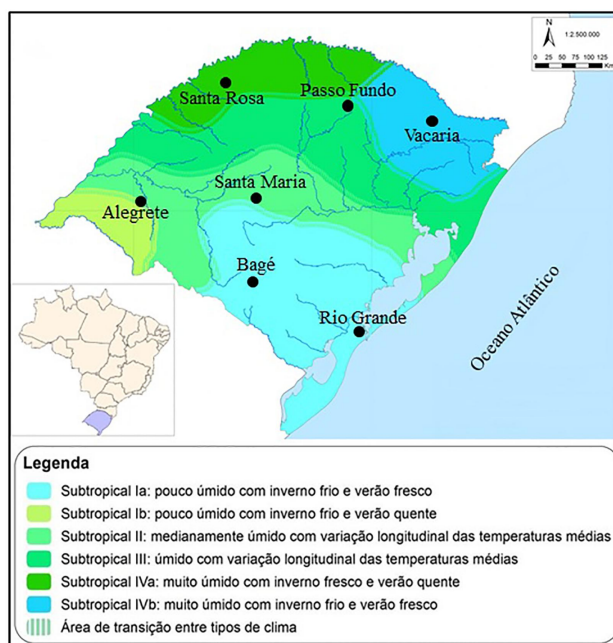


Figura 1 - Mapa do Rio Grande do Sul em diferentes regiões climáticas de acordo com Rossato (2020) com a localização dos sete municípios utilizados no estudo. Adaptado de Rossato (2020).

Tabela 1 - Métodos de ET_o 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 <i>et al.</i> (2013)
A	Albrecht	$ET_o = (0,1005 + 0,297 \cdot u_2) \cdot (e_s - e_a)$	Yang <i>et al.</i> (2021)
A	Meyer	$ET_o = (0,375 + 0,05026 \cdot u_2) \cdot (e_s - e_a)$	Tabari <i>et al.</i> (2013)
A	Brockamp-Wenner	$ET_o = 0,543 \cdot u_2^{0,456} \cdot (e_s - e_a)$	Yang <i>et al.</i> (2021)
A	Rohwer	$ET_o = 0,44 \cdot (1 + 0,27 \cdot u_2) \cdot (e_s - e_a)$	Yang <i>et al.</i> (2021)
A	WMO 1966	$ET_o = (0,1298 + 0,0934 \cdot u_2) \cdot (e_s - e_a)$	Tabari <i>et al.</i> (2013)
A	Mahringer	$ET_o = 0,15072 \cdot \sqrt{3,6 \cdot u_2} \cdot (e_s - e_a)$	Tabari <i>et al.</i> (2013)
A	Harbeck	$ET_o = (0,0578 \cdot u_8) \cdot (e_s - e_a) \cdot 25,4$	Yang <i>et al.</i> (2021)
T	Schendel	$ET_o = 16 \cdot \frac{T}{UR}$	Tabari <i>et al.</i> (2013)
T	Hargreaves-Samani-1	$ET_o = 0,408 \cdot 0,0030(T + 20)(T_{mx} - T_{mn})^{0,4} R_0$	Droogers;Allen(2002)
T	Hargreaves-Samani-2	$ET_o = 0,408 \cdot 0,0025(T + 16,8)(T_{mx} - T_{mn})^{0,5} R_0$	Droogers;Allen(2002)
T	Hargreaves-Samani-3	$ET_o = 0,408 \cdot 0,0023(T + 17,8)(T_{mx} - T_{mn})^{0,424} R_0$	Trajkovic (2007)
T	Baier-Robertson	$ET_o = 0,157 \cdot T_{mx} + 0,158 \cdot (T_{mx} - T_{mn}) + 0,109 \cdot R_0 - 5,39$	Yang <i>et al.</i> (2021)
T	Romanenko	$ET_o = 4,5 \left(1 + \frac{T}{25}\right)^2 \left(1 - \frac{e_a}{e_s}\right)$	Tanaka <i>et al.</i> (2016)
T	Valiantzas-1	$ET_o = 0,0118 \left(1 - \frac{UR}{100}\right)^{0,2} (T_{mx} - T_{mn})^{0,3} (R_0 \sqrt{T + 10} - 40) + 0,1(T + 20) \left(1 - \frac{UR}{100}\right)$	Souza <i>et al.</i> (2022)
T	Camargo	$ET_o = 0,408 \cdot F \cdot R_0 \cdot T$	Araújo <i>et al.</i> (2012)
T	Camargo modificado	$ET_o = 0,408 \cdot F \cdot R_0 \{0,36[3 \cdot (T_{mx} - T_{mn})]\}$	Araújo <i>et al.</i> (2012)
R	Turc	$ET_o = 0,013 \left(\frac{T}{T+15}\right) (R_g + 50) \left(1 + \frac{50-UR}{70}\right)$ para $UR < 50\%$ $ET_o = 0,013 \left(\frac{T}{T+15}\right) (R_g + 50)$ para $UR \geq 50\%$	Yang <i>et al.</i> (2021)
R	Jensen-Haise	$ET_o = (0,014 \cdot T - 0,37) \cdot (R_g - 0,000673) \cdot 25,4$	Yang <i>et al.</i> (2021)
R	Stephens-Stewart	$ET_o = (0,0082 \cdot T - 0,19) \left(\frac{R_g}{1500}\right) \cdot 25,4$	Yang <i>et al.</i> (2021)
R	Hargreaves	$ET_o = 0,0135 \cdot R_g \cdot \frac{(T+17,8)}{\lambda}$	Yang <i>et al.</i> (2021)
R	Milly-Dunne	$ET_o = 0,8 \cdot \frac{(R_N - G)}{\lambda}$	Yang <i>et al.</i> (2021)
R	Priestley-Taylor	$ET_o = 1,26 \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta - \gamma}\right) \left(\frac{R_N - G}{\lambda}\right)$	Yang <i>et al.</i> (2021)
R	Makkink	$ET_o = 0,61 \cdot (0,483 + 0,01 \cdot T) \cdot R_g - 0,12$	Souza <i>et al.</i> (2022)
R	Irmak	$ET_o = -0,611 + 0,149 \cdot R_g + 0,079 \cdot T$	Tabari <i>et al.</i> (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 <i>et al.</i> (2013)
R	Tanner-Pelton	$ET_o = 0,457 \cdot R_N - 0,11$	Silva <i>et al.</i> (2018)
R	Hicks-Hess	$ET_o = \frac{R_N}{\lambda} \left(\frac{\Delta}{0,9\Delta + 0,63\gamma}\right)$	Silva <i>et al.</i> (2018)
R	Tabari	$ET_o = -0,478 + 0,156 \cdot R_g - 0,0112 \cdot T_{mx} + 0,0773 \cdot T_{mn}$	Souza <i>et al.</i> (2022)
R	Souza-Silva	$ET_o = -0,00728 + 1,356325 \cdot (e_s - e_a) + 0,174658 \cdot R_g$	Souza <i>et al.</i> (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 <i>et al.</i> (2022)
R	Valiantzas-3	$ET_o = 0,0393 \cdot R_g \cdot \sqrt{T+9,5} - 2,4 \left(\frac{R_g}{R_0}\right)^2 + Cu(T+20) \left(1 - \frac{UR}{100}\right)$	Souza <i>et al.</i> (2022)

Nota: u_2 e u_8 é a velocidade do vento a 2 m e 8 m de altura, respectivamente, em m.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 KPa; T , T_{mn} , T_{mx} é a temperatura média, mínima e máxima do ar, em °C; UR é a umidade relativa do ar, em %; λ é o calor latente de evaporação, igual a $2,45 \text{ MJ.kg}^{-1}$; ρ é a densidade da água, em kg.m^{-3} ; F é o fator de ajuste, baseado na temperatura média anual; R_g é a radiação solar, em $\text{MJ.m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, exceto nos métodos de Turc, de Jensen-Haise e de Stephens-Stewart, em $\text{cal.cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e no método de Makkink, em mm.dia^{-1} ; R_n é a radiação líquida e R_0 é a radiação solar extraterrestre, ambas em $\text{MJ.m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e estimadas conforme apresentado em Allen *et al.* (1998); G é o fluxo de calor no solo, em $\text{MJ.m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, que será desconsiderado na escala diária e decenal; Δ é a declividade da curva de pressão do vapor d'água, em $\text{KPa.}^\circ\text{C}^{-1}$; 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 $\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$, que varia em função da altitude (Allen *et al.*, 1998).

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

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

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

O fluxo de calor no solo para o mês i é $G_i = 0,07(T_{i+1} - T_{i-1})$.

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-56.

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

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-56 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 Eq. (4).

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

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

O erro quadrático médio da estimativa (EQM) foi calculado conforme a Eq. (5), considerando a soma da diferença das ET_o estimadas pelos métodos com as obtidas por PM FAO-56, onde N , representa o número de dados de ET_o .

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X)^2}{N - 1}} \quad (5)$$

O erro médio (EM) representa a diferença entre as médias de ET_o , estimada pelos métodos e a ET_o obtida por PM FAO-56, 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 Eq. (6).

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

Para verificar a significância estatística ao nível de 5% entre as médias da ET_o estimada pelos 32 métodos com as obtidas por PM FAO-56, foi utilizado o teste t-Student.

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

3. Resultados e Discussão

A Tabela 3 evidencia os melhores desempenhos atribuídos aos métodos baseados na radiação e a sua diferença em relação aos demais, principalmente, aqueles aerodinâmicos. Salvo exceções, no Rio Grande do Sul os métodos baseados na radiação tiveram seus desempenhos predominantemente classificados como ‘muito bom’ a ‘ótimo’ como nos municípios do Alegrete, Rio Grande, Santa Maria, Santa Rosa e Bagé. Tabari (2010) também atestou o bom desempenho de métodos baseados na radiação. Dos quatro métodos avaliados pelo pesquisador (Makkink, Turc, Priestley-Taylor e Hargreaves) para diferentes regiões climáticas do Irã, o método de Turc foi 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. Dentre as três versões avaliadas do método de Hargreaves em estudo de Tabari *et al.* (2013), aquela que utiliza dados de precipitação forneceu estimativas mais próximas de ET_o , apesar de que todas tiveram uma boa performance com coeficientes de determinação acima de 0,90. Para um ambiente de floresta mediterrânea, Bourletsikas *et al.* (2017) avaliaram 24 métodos de ET_o comparando com Penman-Monteith (PM FAO-56), e encontraram o de Hargreaves e uma das equações de Valiantzas como os de melhores performances na estimativa da ET_o diária.

Nas condições climáticas de Bagé, os métodos avaliados tiveram os melhores desempenhos no Estado, não somente os que necessitam de radiação solar que de forma unânime tiveram um ‘ótimo’ desempenho, quanto os aerodinâmicos, como o de Brockamp que teve um desempenho ‘muito bom’, isto é, mesmo havendo apenas disponibilidade de dados de umidade do ar, pode-se estimar ET_o neste município com uma boa eficácia. Analisando os demais índices obtidos para os métodos baseados na radiação em Bagé, estes tiveram uma variação na estimativa de ET_o de 0,82 mm.dia⁻¹ (métodos de Stephens-Stew e de Ritchie) até 2,88 mm.dia⁻¹ (métodos de Jensen-Hai e de Makkink), em que, recorrendo ao R^2 a ET_o de PM FAO-56 explicou de 79% (método de Valiantzas-1) a 97% (métodos de Priestley-Taylor, de Hicks-Hess, de Souza-Silva e de Valiantzas-2) da variação de ET_o pelos métodos avaliados.

No geral, envolvendo todos os municípios do Estado e os respectivos R^2 , a ET_o padrão (PM FAO-56) explicou mais de 90% da variação de ET_o pelos métodos avaliados baseados na radiação, sendo a exceção o de Valiantzas-1. 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 ET_o , como foi o caso com o de Priestley-Taylor que teve um $EQM = 0,40$ mm.dia⁻¹.

A Tabela 4 mostra a classificação dos 32 métodos avaliados, baseada na média obtida entre os municípios do

Tabela 3 - Avaliação diária da *ETO* estimada por 32 métodos usados neste estudo para os municípios do Alegrete, Bagé, Passo Fundo, Rio Grande, Santa Maria, Santa Rosa e Vacaria.

	Alegrete						Bagé					
	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R^2	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R^2
Trabert	2,83	0,64	-2,35*	0,74	Mau	0,54	2,67	0,89	-2,26*	0,78	Bom	0,61
Albrecht	2,62	0,73	-0,84*	0,59	Mau	0,34	2,18	0,96	-0,26*	0,68	Mediano	0,47
Meyer	2,47	0,70	-2,03*	0,82	Sofrível	0,67	2,57	0,90	-2,20*	0,83	Bom	0,69
Brockkamp	1,80	0,84	-0,71*	0,75	Mediano	0,56	1,61	0,97	-0,54*	0,79	Muito Bom	0,63
Rohwer	2,36	0,72	-1,85*	0,78	Sofrível	0,60	2,33	0,92	-1,90*	0,80	Bom	0,64
WMO-66	3,38	0,57	-2,90*	0,69	Péssimo	0,47	3,25	0,81	-2,85*	0,74	Sofrível	0,55
Mahringer	2,59	0,67	-2,18*	0,84	Sofrível	0,71	2,84	0,87	-2,51*	0,87	Bom	0,75
Harbeck	4,65	0,44	-4,15*	0,54	Péssimo	0,29	4,60	0,40	-4,15*	0,65	Péssimo	0,43
Schendel	1,53	0,83	-0,11 ^{ns}	0,75	Mediano	0,56	1,53	0,98	-0,46*	0,76	Bom	0,58
HS-1	1,45	0,86	-0,39*	0,79	Bom	0,63	1,43	0,98	-0,45*	0,79	Muito Bom	0,63
HS-2	1,42	0,87	-0,46*	0,81	Bom	0,66	1,40	0,98	-0,53*	0,82	Muito Bom	0,66
HS-3	2,00	0,73	-1,37*	0,80	Sofrível	0,64	2,02	0,95	-1,45*	0,80	Muito Bom	0,64
Baier-Rob	1,51	0,87	-0,57*	0,80	Bom	0,63	1,50	0,98	-0,72*	0,81	Muito Bom	0,65
Romanenko	1,32	0,91	-0,47*	0,85	Muito Bom	0,72	1,43	0,98	-0,92*	0,87	Ótimo	0,76
Camargo	2,53	0,64	-1,78*	0,62	Péssimo	0,39	2,62	0,90	-1,95*	0,62	Sofrível	0,39
Camargo mod	3,30	0,57	-2,86*	0,85	Mau	0,72	3,35	0,78	-2,97*	0,87	Bom	0,75
Turc	2,15	0,78	-2,01*	0,97	Muito Bom	0,95	2,21	0,93	-2,09*	0,97	Ótimo	0,95
Jensen-Hai	2,67	0,83	2,05*	0,98	Muito Bom	0,96	2,88	0,95	2,31*	0,97	Ótimo	0,94
Stephens-Stew	0,87	0,96	-0,72*	0,98	Ótimo	0,96	0,82	0,99	-0,63*	0,97	Ótimo	0,94
Hargreaves	1,01	0,95	-0,86*	0,98	Ótimo	0,95	0,96	0,99	-0,79*	0,97	Ótimo	0,94
Milly-Dunne	1,34	0,93	1,08*	0,97	Ótimo	0,94	1,62	0,98	1,34*	0,96	Ótimo	0,92
Priestley-Taylor	1,35	0,94	1,11*	0,99	Ótimo	0,98	1,54	0,98	1,29*	0,99	Ótimo	0,97
Irmak	1,38	0,88	-1,04*	0,97	Ótimo	0,95	1,33	0,98	-1,01*	0,97	Ótimo	0,94
Ritchie	0,86	0,96	-0,72*	0,98	Ótimo	0,96	0,82	0,99	-0,63*	0,97	Ótimo	0,95
Tanner-Pelton	3,72	0,73	3,27*	0,97	Bom	0,94	4,15	0,92	3,69*	0,96	Ótimo	0,92
Hicks-Hess	1,26	0,94	1,04*	0,99	Ótimo	0,98	1,47	0,98	1,24*	0,98	Ótimo	0,97
Souza-Silva	0,95	0,95	-0,79*	0,99	Ótimo	0,99	0,91	0,99	-0,74*	0,99	Ótimo	0,97
Valiantzas-1	1,46	0,87	-0,89*	0,87	Muito Bom	0,76	1,50	0,97	-1,05*	0,89	Ótimo	0,79
Valiantzas-2	1,76	0,85	-1,65*	0,98	Muito Bom	0,97	1,78	0,96	-1,69*	0,99	Ótimo	0,97
Valiantzas-3	0,93	0,95	-0,69*	0,96	Ótimo	0,93	0,94	0,99	-0,70*	0,96	Ótimo	0,92
Tabari	1,83	0,80	-1,52*	0,96	Muito Bom	0,92	1,76	0,96	-1,47*	0,96	Ótimo	0,91
Makkink	2,58	0,83	2,16*	0,98	Muito Bom	0,97	2,88	0,95	2,46*	0,97	Ótimo	0,95

	Passo Fundo						Rio Grande					
	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R^2	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R^2
Trabert	2,53	0,63	-2,21*	0,78	Mau	0,62	2,30	0,64	-1,89*	0,73	Mau	0,53
Albrecht	1,81	0,81	-0,67*	0,71	Sofrível	0,51	1,87	0,79	-0,14*	0,65	Sofrível	0,42
Meyer	2,41	0,65	-2,12*	0,83	Sofrível	0,68	2,19	0,66	-1,79*	0,77	Sofrível	0,59
Brockkamp	1,52	0,85	-0,78*	0,79	Bom	0,63	1,43	0,85	-0,29*	0,74	Mediano	0,54
Rohwer	2,22	0,69	-1,90*	0,81	Sofrível	0,65	2,00	0,70	-1,54*	0,74	Sofrível	0,55
WMO-66	3,03	0,55	-2,71*	0,76	Mau	0,58	2,82	0,56	-2,44*	0,70	Péssimo	0,49
Mahringer	2,61	0,62	-2,34*	0,85	Sofrível	0,72	2,42	0,62	-2,04*	0,80	Mau	0,64
Harbeck	4,16	0,43	-3,79*	0,69	Péssimo	0,47	4,03	0,44	-3,64*	0,62	Péssimo	0,39
Schendel	1,33	0,81	-0,27*	0,74	Sofrível	0,55	1,37	0,78	0,03 ^{ns}	0,70	Sofrível	0,49
HS-1	1,36	0,83	-0,20*	0,72	Sofrível	0,52	1,40	0,81	-0,58*	0,75	Mediano	0,56
HS-2	1,31	0,84	-0,31*	0,75	Mediano	0,57	1,49	0,80	-0,79*	0,75	Sofrível	0,56
HS-3	1,77	0,71	-1,15*	0,73	Sofrível	0,53	1,95	0,68	-1,44*	0,75	Mau	0,56
Baier-Rob	1,40	0,84	-0,48*	0,75	Mediano	0,56	1,67	0,78	-1,03*	0,74	Sofrível	0,54

(continua)

Tabela 3 - continua

	Passo Fundo					Rio Grande						
	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R^2	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R^2
Romanenko	1,40	0,87	-0,96*	0,85	Bom	0,73	1,26	0,86	-0,53*	0,80	Bom	0,64
Camargo	2,33	0,57	-1,64*	0,52	Péssimo	0,27	2,05	0,66	-1,40*	0,62	Mau	0,38
Camargo mod	3,00	0,54	-2,65*	0,84	Mau	0,71	3,37	0,49	-2,98*	0,69	Péssimo	0,47
Turc	2,16	0,72	-2,04*	0,97	Bom	0,93	2,06	0,73	-1,94*	0,98	Bom	0,96
Jensen-Hai	2,36	0,81	1,93*	0,96	Muito bom	0,92	2,53	0,80	1,93*	0,97	Muito bom	0,95
Stephens-Stew	0,84	0,95	-0,64*	0,96	Ótimo	0,92	0,76	0,96	-0,61*	0,97	Ótimo	0,95
Hargreaves	0,96	0,93	-0,77*	0,96	Ótimo	0,92	0,84	0,95	-0,72*	0,97	Ótimo	0,95
Milly-Dunne	1,37	0,91	1,16*	0,96	Ótimo	0,93	1,32	0,91	1,04*	0,97	Ótimo	0,93
Priestley-Taylor	1,40	0,91	1,22*	0,99	Ótimo	0,97	1,29	0,92	1,01*	0,99	Ótimo	0,97
Irmak	1,18	0,87	-0,85*	0,96	Muito bom	0,92	1,05	0,90	-0,80*	0,97	Ótimo	0,94
Ritchie	0,80	0,95	-0,59*	0,97	Ótimo	0,93	0,75	0,96	-0,62*	0,98	Ótimo	0,95
Tanner-Pelton	3,61	0,67	3,25*	0,96	Mediano	0,92	3,48	0,69	3,03*	0,96	Bom	0,93
Hicks-Hess	1,32	0,91	1,15*	0,98	Ótimo	0,97	1,22	0,93	0,96*	0,98	Ótimo	0,97
Souza-Silva	0,83	0,94	-0,68*	0,99	Ótimo	0,98	0,76	0,95	-0,64*	0,99	Ótimo	0,98
Valiantzas-1	1,35	0,85	-0,89*	0,85	Ótimo	0,73	1,39	0,82	-0,91*	0,85	Ótimo	0,72
Valiantzas-2	1,72	0,80	-1,62*	0,98	Ótimo	0,96	1,61	0,82	-1,53*	0,99	Ótimo	0,97
Valiantzas-3	0,91	0,94	-0,64*	0,94	Ótimo	0,89	0,71	0,96	-0,50*	0,96	Ótimo	0,93
Tabari	1,56	0,79	-1,27*	0,94	Bom	0,88	1,34	0,85	-1,13*	0,96	Muito bom	0,92
Makkink	2,45	0,79	2,14*	0,97	Muito bom	0,94	2,53	0,79	2,08*	0,98	Muito bom	0,96
	Santa Maria					Santa Rosa						
	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R^2	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R^2
Trabert	2,92	0,58	-2,45*	0,61	Péssimo	0,38	2,98	0,60	-2,46*	0,66	Péssimo	0,44
Albrecht	2,74	0,64	-1,62*	0,52	Péssimo	0,27	2,51	0,70	-1,61*	0,60	Mau	0,36
Meyer	2,60	0,63	-2,15*	0,69	Mau	0,48	2,50	0,67	-1,96*	0,72	Mau	0,51
Brockamp	2,23	0,72	-1,29*	0,63	Mau	0,39	2,04	0,78	-0,97*	0,67	Sofrível	0,45
Rohwer	2,58	0,64	-2,08*	0,65	Mau	0,43	2,49	0,68	-1,91*	0,70	Mau	0,49
WMO-66	3,31	0,52	-2,87*	0,59	Péssimo	0,34	3,49	0,53	-3,01*	0,66	Péssimo	0,44
Mahringer	2,60	0,62	-2,19*	0,74	Mau	0,54	2,46	0,68	-1,93*	0,73	Mau	0,54
Harbeck	4,18	0,43	-3,74*	0,48	Péssimo	0,23	4,62	0,43	-4,12*	0,57	Péssimo	0,32
Schendel	1,54	0,77	0,09 ^{ns}	0,65	Mau	0,42	1,77	0,78	0,35*	0,64	Mau	0,41
HS-1	1,37	0,84	0,07 ^{ns}	0,74	Mediano	0,54	1,61	0,82	0,10 ^{ns}	0,69	Sofrível	0,48
HS-2	1,33	0,86	-0,04 ^{ns}	0,76	Mediano	0,57	1,56	0,84	0,05 ^{ns}	0,72	Sofrível	0,52
HS-3	1,63	0,76	-0,88	0,74	Sofrível	0,55	1,87	0,72	-0,95*	0,70	Sofrível	0,49
Baier-Rob	1,42	0,85	-0,16*	0,74	Mediano	0,54	1,55	0,84	0,03 ^{ns}	0,72	Mediano	0,53
Romanenko	1,70	0,82	-0,90*	0,74	Sofrível	0,55	1,65	0,86	-0,18*	0,74	Mediano	0,55
Camargo	2,07	0,65	-1,17*	0,55	Péssimo	0,30	2,35	0,61	-1,31*	0,50	Péssimo	0,25
Camargo mod	2,83	0,56	-2,42*	0,80	Mau	0,63	3,04	0,57	-2,56*	0,78	Mau	0,61
Turc	2,18	0,72	-2,01*	0,96	Bom	0,92	2,13	0,77	-1,96*	0,96	Bom	0,93
Jensen-Hai	2,58	0,80	2,00*	0,96	Muito bom	0,92	2,60	0,83	2,05*	0,97	Muito bom	0,94
Stephens-Stew	0,76	0,96	-0,50*	0,96	Ótimo	0,92	0,84	0,96	-0,65*	0,97	Ótimo	0,94
Hargreaves	0,84	0,95	-0,61*	0,96	Ótimo	0,92	0,97	0,95	-0,78*	0,97	Ótimo	0,94
Milly-Dunne	1,30	0,92	1,04*	0,96	Ótimo	0,92	1,13	0,95	0,87*	0,97	Ótimo	0,95
Priestley-Taylor	1,30	0,93	1,07*	0,98	Ótimo	0,97	1,27	0,94	1,03*	0,99	Ótimo	0,98
Irmak	1,06	0,90	-0,67*	0,96	Ótimo	0,91	1,32	0,88	-0,90*	0,97	Muito bom	0,93

(continua)

Tabela 3 - continua

	Santa Maria					Santa Rosa						
	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R ²	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R ²
Ritchie	0,74	0,96	-0,48*	0,96	Ótimo	0,92	0,85	0,96	-0,66*	0,97	Ótimo	0,95
Tanner-Pelton	3,40	0,71	2,97*	0,96	Bom	0,92	3,34	0,75	2,90*	0,97	Muito bom	0,94
Hicks-Hess	1,23	0,93	1,01*	0,98	Ótimo	0,96	1,16	0,95	0,94*	0,99	Ótimo	0,98
Souza-Silva	0,82	0,95	-0,65*	0,99	Ótimo	0,98	0,93	0,95	-0,75*	0,99	Ótimo	0,99
Valiantzas-1	1,36	0,85	-0,80*	0,84	Ótimo	0,71	1,48	0,85	-0,54*	0,78	Ótimo	0,61
Valiantzas-2	1,63	0,83	-1,52*	0,98	Ótimo	0,96	1,66	0,85	-1,53*	0,98	Ótimo	0,96
Valiantzas-3	0,80	0,96	-0,53*	0,96	Ótimo	0,92	0,84	0,96	-0,54*	0,96	Ótimo	0,93
Tabari	1,45	0,83	-1,12*	0,94	Muito bom	0,88	1,78	0,79	-1,42*	0,94	Muito bom	0,89
Makkink	2,55	0,80	2,14*	0,96	Muito bom	0,93	2,48	0,83	2,11*	0,98	Muito bom	0,95

Vacaria						
	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R ²
Trabert	2,82	0,56	-2,51*	0,76	Mau	0,58
Albrecht	2,09	0,71	-1,53*	0,67	Mau	0,45
Meyer	2,70	0,58	-2,42*	0,81	Mau	0,65
Brockamp	1,94	0,74	-1,54*	0,77	Sofrível	0,59
Rohwer	2,58	0,60	-2,28*	0,78	Mau	0,61
WMO-66	3,18	0,50	-2,86*	0,73	Péssimo	0,54
Mahringer	2,82	0,56	-2,55*	0,83	Mau	0,69
Harbeck	3,96	0,42	-3,58*	0,64	Péssimo	0,41
Schendel	1,50	0,72	-0,64*	0,68	Mau	0,46
HS-1	1,26	0,83	0,00 ^{ns}	0,73	Mediano	0,53
HS-2	1,20	0,85	-0,12*	0,76	Mediano	0,57
HS-3	1,57	0,73	-0,92*	0,73	Sofrível	0,54
Baier-Rob	1,26	0,86	-0,33*	0,76	Mediano	0,58
Romanenko	1,86	0,75	-1,56*	0,84	Mediano	0,70
Camargo	2,26	0,56	-1,61*	0,51	Péssimo	0,26
Camargo mod	2,59	0,57	-2,24*	0,84	Mau	0,71
Turc	2,19	0,68	-2,05*	0,96	Mediano	0,93
Jensen-Hai	2,27	0,80	1,88*	0,96	Muito Bom	0,93
Stephens-Stew	0,71	0,96	-0,52*	0,96	Ótimo	0,93
Hargreaves	0,83	0,94	-0,64*	0,96	Ótimo	0,92
Milly-Dunne	1,63	0,87	1,46*	0,97	Muito Bom	0,94
Priestley-Taylor	1,54	0,88	1,39*	0,99	Ótimo	0,98
Irmak	0,99	0,90	-0,67*	0,96	Ótimo	0,92
Ritchie	0,63	0,97	-0,40*	0,97	Ótimo	0,93
Tanner-Pelton	3,87	0,63	3,53*	0,97	Mediano	0,94
Hicks-Hess	1,49	0,89	1,35*	0,99	Ótimo	0,98
Souza-Silva	0,66	0,96	-0,50*	0,99	Ótimo	0,98
Valiantzas-1	1,35	0,83	-0,98*	0,87	Bom	0,76
Valiantzas-2	1,70	0,79	-1,60*	0,98	Muito Bom	0,96
Valiantzas-3	0,88	0,93	-0,62*	0,94	Ótimo	0,89
Tabari	1,35	0,82	-1,08*	0,94	Muito Bom	0,88
Makkink	2,52	0,77	2,24*	0,97	Bom	0,95

* Significativo ao nível de 5% pelo teste t-Student; ^{ns} Não significativo.

Tabela 4 - Média e coeficiente de variação (CV) do *EQM* entre os municípios do Rio Grande do Sul usados no estudo da *ET_o* 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	0,78	9,5
2	Stephens-Stew	R	0,80	6,6
3	Souza-Silva	R	0,84	11,4
4	Valiantzas-3	R	0,86	8,9
5	Hargreaves	R	0,92	7,7
6	Irmak	R	1,19	12,3
7	Hicks-Hess	R	1,31	9
8	Priestley-Taylor	R	1,38	7,7
9	HS-2	T	1,39	8
10	Milly-Dunne	R	1,39	12
11	HS-1	T	1,41	7
12	Valiantzas-1	R	1,41	4,3
13	Baier-Rob	T	1,47	8,1
14	Schendel	T	1,51	8,7
15	Romanenko	T	1,52	13,5
16	Tabari	R	1,58	12,3
17	Valiantzas-2	R	1,69	3,5
18	Brockamp	A	1,80	15,1
19	HS-3	T	1,83	9,1
20	Turc	R	2,16	2,1
21	Albrecht	A	2,26	15,1
22	Camargo	T	2,31	8,6
23	Rohwer	A	2,37	8,2
24	Meyer	A	2,49	6,1
25	Jensen-Hai	R	2,56	7,3
26	Makkink	R	2,57	5,2
27	Mahringer	A	2,62	5,7
28	Trabert	A	2,72	8,2
29	Camargo-mod	T	3,07	8,8
30	WMO-66	A	3,21	6,5
31	Tanner-Pelton	R	3,65	7,3
32	Harbeck	A	4,31	6,4

erro quadrático médio (*EQM*), onde tem-se os métodos baseados na radiação ocupando as oito primeiras posições, com o de Ritchie apresentando para o Estado, uma variação média na estimativa da *ET_o* de 0,78 mm.dia⁻¹ em relação a *ET_o* de PM FAO-56. O coeficiente de variação (CV) do *EQM* de cada método entre os municípios gaúchos apresentou uma baixa dispersão, sendo de 2,1% a 15,1%.

O erro médio (*EM*) para os métodos baseados na radiação apresentaram uma diversidade na tendência das estimativas de *ET_o*. Destes, o de Tanner-Pelton foi o método que apresentou a maior dispersão na tendência, sendo de superestimar a *ET_o* em 2,9 mm.dia⁻¹ (em Santa Rosa) a 3,69 mm.dia⁻¹ (em Bagé). Outra notação a ser

destacada refere-se a tendência dos métodos de Irmak e de Ritchie em subestimar a *ET_o* em todos os locais, enquanto em outras regiões úmidas do planeta como no Irã, para ambos os métodos (Tabari *et al.*, 2013) e no estado americano da Flórida (Irmak *et al.*, 2003), a tendência na estimativa foi contrária.

A Fig. 2 apresenta dois gráficos de dispersão 1:1 para cada município usado no estudo, sendo dos métodos baseados na radiação que obtiveram os maiores R², conjuntamente com menor (maior) *EM* positivo (*EM* negativo), pois quanto mais próximo de zero, maior a possibilidade de haver diferentes tendências de acordo com os valores estimados. Assim, foi unânime a apresentação dos gráficos para os métodos de Souza-Silva e Hicks-Hess em todos os municípios analisados. Nestes, percebe-se que o método de Hicks-Hess tende a superestimar a *ET_o* para valores aproximadamente a partir de 1,5 mm.dia⁻¹, sendo em Vacaria (Fig. 2m) a única exceção, pois esta tendência é válida para qualquer valor estimado. Quanto ao método de Souza-Silva, a subestimativa de *ET_o* tende a ocorrer para valores a partir de 1,5 mm.dia⁻¹ (Alegrete, Bagé, Rio Grande, Santa Maria) ou de 2,0 mm.dia⁻¹ (Passo Fundo, Santa Rosa e Vacaria).

Analisando os índices de confiança, percebe-se que a estimativa da *ET_o* na escala decendial apresentou cenário semelhante aos obtidos na escala diária, isto é, os métodos baseados na radiação tiveram relativamente os melhores desempenhos (Tabela 5). Porém, chama a atenção para algumas exceções bem expressivas nestes métodos, como o de Tanner-Pelton que tiveram um ‘mau’ (Vacaria) e ‘sofrível’ (Bagé e Passo Fundo) desempenho, assim como, o método de Turc nos municípios de Vacaria e Passo Fundo com desempenho ‘sofrível’.

Em tese, se um método fornece boas estimativas na escala diária, espera-se que isto ocorra em escalas de tempo maiores devido a suavização das variações diárias, mas este raciocínio não é uma regra (Pereira *et al.*, 2013), por isso a importância em realizar avaliações para diferentes escalas de tempo.

No entanto, com exceção de Santa Rosa, para os demais municípios do Rio Grande do Sul usados no estudo, pode-se estimar a *ET_o* com um desempenho igual ou superior a ‘muito bom’ recorrendo a dados apenas de temperatura do ar. Para estes municípios e métodos baseados na temperatura com os referidos desempenhos, o R² mostra que a *ET_o* de PM FAO-56 explicou entre 70% a 80% da variação de *ET_o* em Passo Fundo, Santa Maria e Vacaria, e acima de 80% para Alegrete, Bagé e Rio Grande. Estes resultados facilitam a estimativa de *ET_o*, tendo em vista, que dados de temperatura do ar são habitualmente disponibilizados nas estações meteorológicas e os termômetros são instrumentos com custo relativamente baixo. No Irã, Amirashayeri *et al.* (2023) averiguaram que os métodos de Romanenko e Schendel que necessitam apenas de temperatura do ar, tiveram os melhores desempenhos do

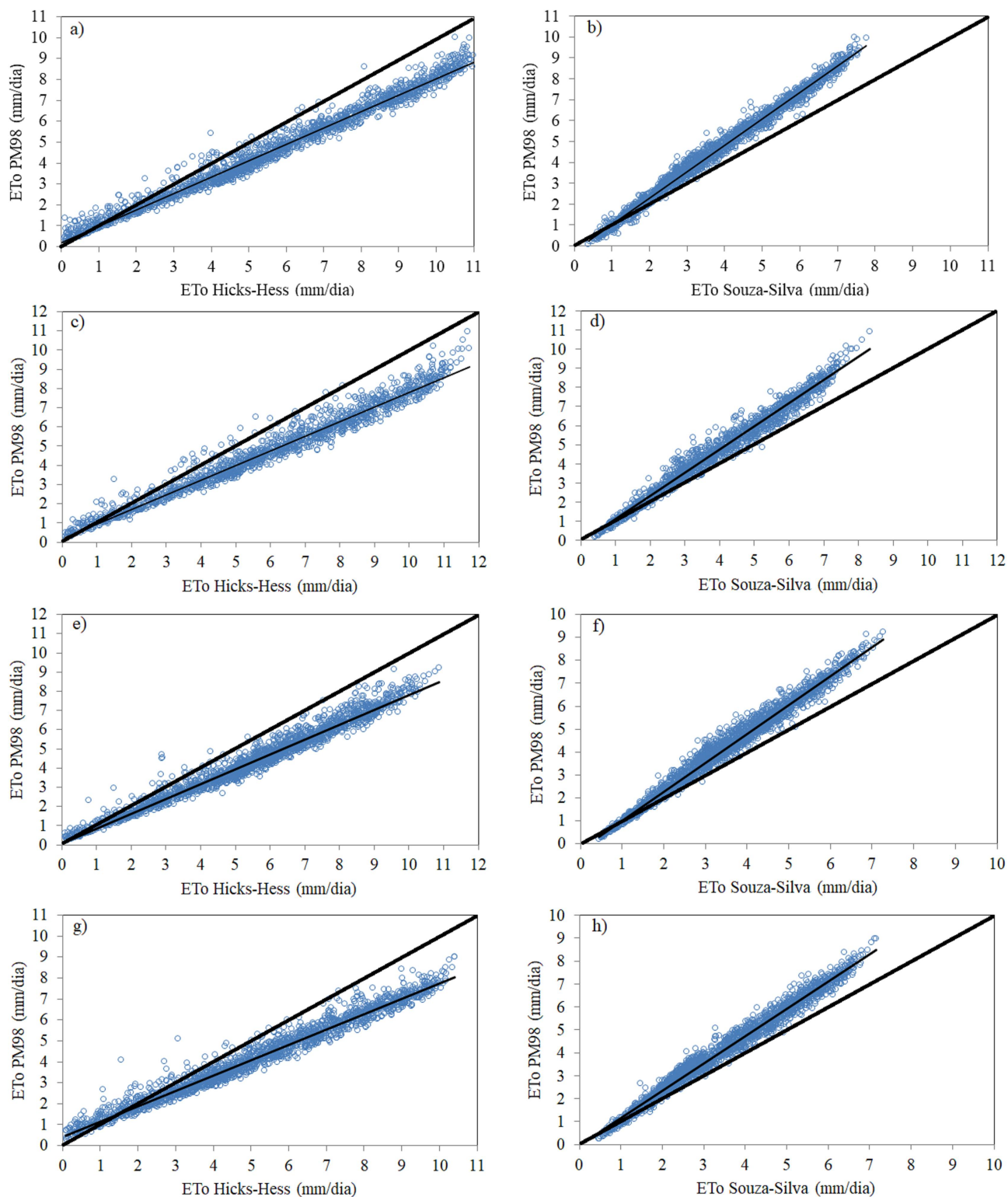


Figura 2 - Gráficos de dispersão 1:1 entre a ETo diária ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) padrão (PM FAO98) e alguns métodos avaliados para os municípios do Alegrete (2a e 2b), Bagé ((2c e (2d), Passo Fundo ((2e e (2f), Rio Grande (2g e 2h), Santa Maria (2i e 2j), Santa Rosa (2k e 2l) e de Vacaria (2m e 2n).

que a ETo estimada usando rede neural artificial. Ademais, dados de temperatura também podem ser interpolados com razoável precisão quando não há disponibilidade de

dados instrumentais. Porém, usando o método de Hargreaves-Samani, [Landeraset et al. \(2008\)](#) chamaram a atenção pela grande variabilidade espacial encontrada na precisão

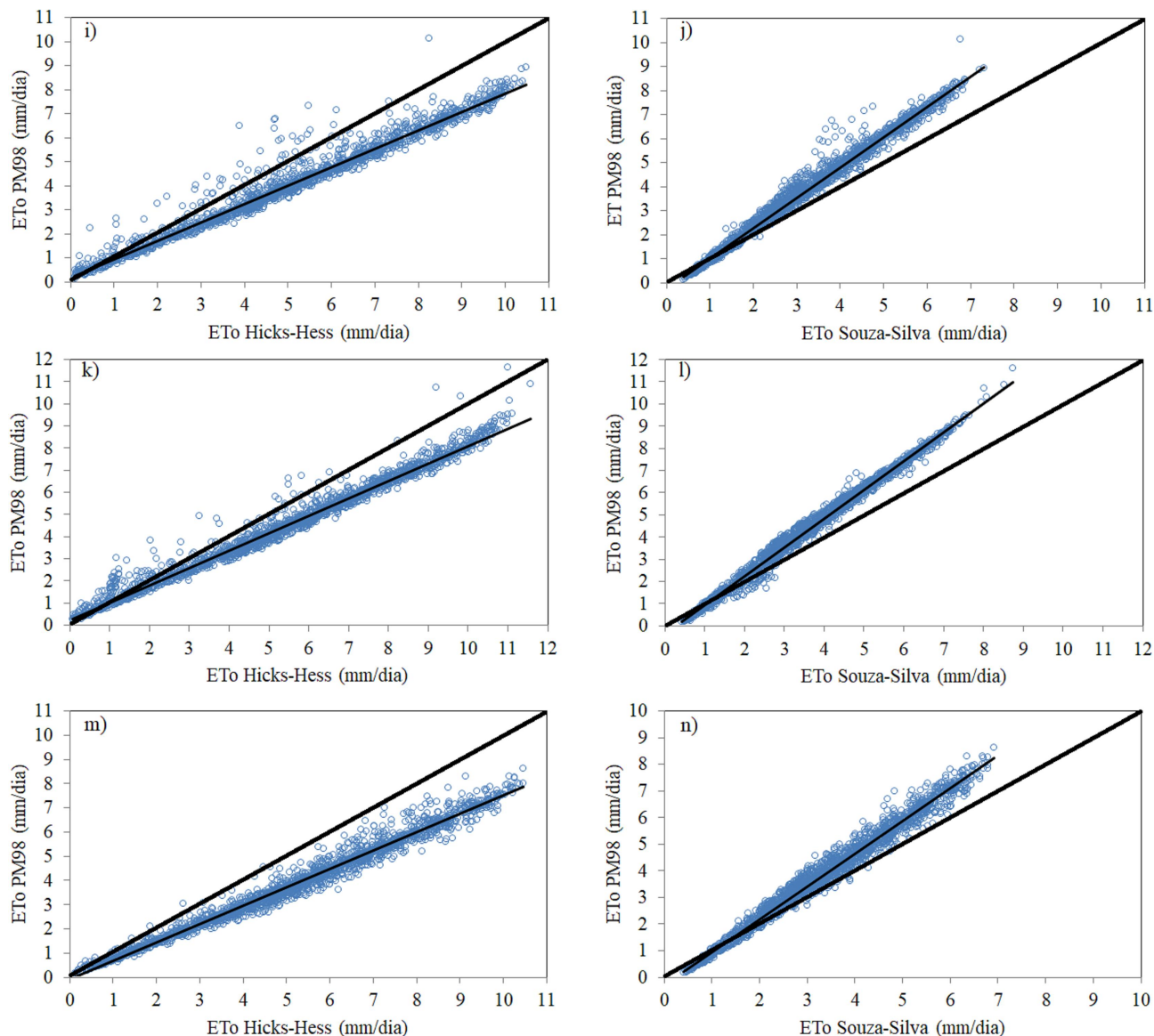


Figura 2 (cont.) - Gráficos de dispersão 1:1 entre a ETo diária (mm.dia^{-1}) padrão (PM FAO98) e alguns métodos avaliados para os municípios do Alegrete (2a e 2b), Bagé (2c e 2d), Passo Fundo (2e e 2f), Rio Grande (2g e 2h), Santa Maria (2i e 2j), Santa Rosa (2k e 2l) e de Vacaria (2m e 2n).

Tabela 5 - Avaliação decendial da ETo estimada por 32 métodos usados neste estudo para os municípios do Alegrete, Bagé, Passo Fundo, Rio Grande, Santa Maria, Santa Rosa e Vacaria.

	Alegrete						Bagé					
	EQM	d	EM	r	c	R ²	EQM	d	EM	r	c	R ²
Trabert	2,47	0,62	-2,22*	0,80	Mau	0,65	2,34	0,63	-2,15*	0,91	Sufrível	0,83
Albrecht	2,02	0,74	-0,79*	0,63	Mau	0,40	0,97	0,92	-0,32 ^{ns}	0,87	Muito Bom	0,75
Meyer	2,15	0,67	-1,95*	0,90	Sufrível	0,81	2,29	0,64	-2,11*	0,93	Sufrível	0,86
Brockamp	1,25	0,88	-0,63*	0,82	Bom	0,68	0,87	0,93	-0,52*	0,91	Ótimo	0,84
Rohwer	2,01	0,70	-1,77*	0,85	Sufrível	0,72	2,01	0,69	-1,84*	0,92	Mediano	0,84
WMO-66	3,04	0,53	-2,78*	0,74	Péssimo	0,55	2,95	0,54	-2,73*	0,89	Mau	0,80
Mahringer	2,28	0,64	-2,09*	0,94	Sufrível	0,88	2,57	0,59	-2,39*	0,94	Sufrível	0,89
Harbeck	4,27	0,41	-3,97*	0,58	Péssimo	0,34	4,24	0,41	-3,95*	0,85	Péssimo	0,73
Schendel	0,82	0,92	-0,07 ^{ns}	0,90	Muito Bom	0,81	0,93	0,89	-0,42*	0,90	Muito Bom	0,82

(continua)

Tabela 5 - continua

	Alegrete					Bagé						
	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R^2	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R^2
HS-1	0,74	0,95	-0,25 ^{ns}	0,92	Ótimo	0,84	0,76	0,95	-0,33 ^{ns}	0,92	Ótimo	0,84
HS-2	0,74	0,95	-0,33 ^{ns}	0,93	Ótimo	0,86	0,77	0,95	-0,42*	0,93	Ótimo	0,86
HS-3	1,44	0,81	-1,22*	0,92	Bom	0,84	1,50	0,79	-1,30*	0,92	Bom	0,85
Baier-Rob	0,87	0,94	-0,52*	0,92	Ótimo	0,85	0,99	0,92	-0,70*	0,93	Ótimo	0,86
Romanenko	0,76	0,95	-0,43*	0,93	Ótimo	0,87	1,06	0,90	-0,88*	0,94	Muito Bom	0,89
Camargo	1,95	0,71	-1,69*	0,83	Sofrível	0,69	2,09	0,68	-1,86*	0,84	Sofrível	0,71
Camargo mod	2,97	0,54	-2,74*	0,95	Sofrível	0,90	3,03	0,53	-2,82*	0,95	Sofrível	0,91
Turc	2,06	0,71	-2,00*	0,99	Bom	0,98	2,12	0,70	-2,06*	0,99	Bom	0,98
Jensen-Haise	2,46	0,78	1,97*	0,98	Muito Bom	0,97	2,68	0,75	2,21*	0,98	Bom	0,96
Stephens-Stew	0,77	0,96	-0,69*	0,98	Ótimo	0,97	0,69	0,96	-0,58*	0,98	Ótimo	0,96
Hargreaves	0,88	0,94	-0,82*	0,98	Ótimo	0,96	0,81	0,95	-0,73*	0,98	Ótimo	0,96
Milly-Dunne	1,08	0,92	1,02*	0,99	Ótimo	0,97	1,38	0,88	1,30*	0,98	Ótimo	0,96
Priestley-Taylor	1,17	0,92	1,06*	1,00	Ótimo	0,99	1,36	0,89	1,25*	0,99	Ótimo	0,99
Irmak	1,12	0,87	-0,96*	0,98	Ótimo	0,96	1,07	0,88	-0,92*	0,98	Ótimo	0,95
Ritchie	0,75	0,95	-0,69*	0,99	Ótimo	0,97	0,66	0,96	-0,58*	0,98	Ótimo	0,97
Tanner-Pelton	3,28	0,66	3,10*	0,98	Mediano	0,97	3,73	0,60	3,54*	0,98	Sofrível	0,96
Hicks-Hess	1,08	0,93	0,99*	1,00	Ótimo	0,99	1,30	0,90	1,20*	0,99	Ótimo	0,99
Souza-Silva	0,82	0,94	-0,74*	1,00	Ótimo	0,99	0,76	0,94	-0,68*	0,99	Ótimo	0,98
Valiantzas-1	0,94	0,92	-0,77*	0,95	Ótimo	0,91	1,06	0,90	-0,93*	0,96	Ótimo	0,91
Valiantzas-2	1,65	0,80	-1,61*	0,99	Muito Bom	0,99	1,67	0,79	-1,63*	0,99	Muito Bom	0,99
Valiantzas-3	0,65	0,97	-0,55*	0,98	Ótimo	0,96	0,67	0,96	-0,55*	0,98	Ótimo	0,95
Tabari	1,58	0,78	-1,44*	0,97	Muito Bom	0,94	1,50	0,79	-1,37*	0,97	Muito Bom	0,94
Makkink	2,41	0,78	2,09*	0,99	Muito Bom	0,97	2,71	0,73	2,38*	0,98	Bom	0,97

	Passo Fundo					Rio Grande						
	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R^2	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R^2
Trabert	2,24	0,55	-2,12*	0,86	Mau	0,74	1,95	0,65	-1,77*	0,89	Sofrível	0,80
Albrecht	1,11	0,84	-0,71*	0,82	Bom	0,67	0,85	0,92	-0,14 ^{ns}	0,87	Muito Bom	0,75
Meyer	2,16	0,57	-2,05*	0,88	Mau	0,78	1,87	0,66	-1,69*	0,90	Sofrível	0,81
Brockamp	1,03	0,86	-0,76*	0,87	Bom	0,75	0,72	0,94	-0,22 ^{ns}	0,89	Muito Bom	0,80
Rohwer	1,96	0,61	-1,84*	0,87	Sofrível	0,76	1,64	0,71	-1,46*	0,90	Mediano	0,80
WMO-66	2,75	0,47	-2,62*	0,85	Péssimo	0,72	2,52	0,55	-2,33*	0,88	Mau	0,78
Mahringer	2,36	0,53	-2,25*	0,90	Mau	0,80	2,12	0,61	-1,93*	0,90	Sofrível	0,81
Harbeck	3,81	0,35	-3,63*	0,80	Péssimo	0,64	3,72	0,41	-3,49*	0,86	Péssimo	0,74
Schendel	0,68	0,90	-0,24*	0,88	Muito Bom	0,77	0,78	0,90	0,09 ^{ns}	0,86	Muito Bom	0,74
HS-1	0,76	0,92	-0,09 ^{ns}	0,85	Muito Bom	0,72	0,73	0,93	-0,44*	0,92	Ótimo	0,85
HS-2	0,75	0,92	-0,21 ^{ns}	0,86	Muito Bom	0,74	0,87	0,91	-0,65*	0,92	Muito Bom	0,85
HS-3	1,22	0,78	-1,02*	0,85	Bom	0,72	1,46	0,75	-1,29*	0,92	Bom	0,85
Baier-Rob	0,92	0,90	-0,46*	0,88	Muito Bom	0,77	1,16	0,87	-0,98*	0,93	Muito Bom	0,86
Romanenko	1,10	0,83	-0,92*	0,89	Bom	0,79	0,79	0,91	-0,46*	0,90	Muito Bom	0,82
Camargo	1,76	0,64	-1,55*	0,76	Mau	0,58	1,50	0,77	-1,31*	0,88	Bom	0,77
Camargo mod	2,67	0,48	-2,54*	0,91	Mau	0,83	3,06	0,48	-2,84*	0,87	Mau	0,76
Turc	2,07	0,60	-2,03*	0,98	Sofrível	0,96	1,95	0,67	-1,89*	0,99	Bom	0,99
Jensen-Haise	2,20	0,71	1,86*	0,96	Bom	0,92	2,33	0,76	1,85*	0,99	Bom	0,97
Stephens-Stew	0,72	0,93	-0,60*	0,96	Ótimo	0,92	0,65	0,96	-0,57*	0,99	Ótimo	0,97

(continua)

Tabela 5 - continua

	Passo Fundo					Rio Grande						
	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R ²	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R ²
Hargreaves	0,81	0,90	-0,72*	0,96	Ótimo	0,91	0,73	0,94	-0,68*	0,99	Ótimo	0,97
Milly-Dunne	1,19	0,84	1,14*	0,98	Muito Bom	0,95	1,09	0,90	0,99*	0,98	Ótimo	0,95
Priestley-Taylor	1,25	0,84	1,18*	0,99	Muito Bom	0,98	1,10	0,90	0,97*	0,99	Ótimo	0,98
Irmak	0,90	0,86	-0,77*	0,95	Muito Bom	0,91	0,83	0,91	-0,73*	0,98	Ótimo	0,97
Ritchie	0,65	0,94	-0,55*	0,96	Ótimo	0,93	0,64	0,96	-0,59*	0,99	Ótimo	0,97
Tanner-Pelton	3,24	0,54	3,14*	0,97	Sofrível	0,95	3,09	0,62	2,89*	0,97	Mediano	0,95
Hicks-Hess	1,17	0,85	1,12*	0,99	Muito Bom	0,98	1,04	0,91	0,93*	0,99	Ótimo	0,98
Souza-Silva	0,68	0,92	-0,63*	0,99	Ótimo	0,98	0,66	0,95	-0,60*	0,99	Ótimo	0,98
Valiantzas-1	0,93	0,88	-0,78*	0,92	Muito Bom	0,85	0,91	0,90	-0,79*	0,96	Ótimo	0,92
Valiantzas-2	1,61	0,71	-1,58*	0,99	Bom	0,97	1,52	0,78	-1,49*	0,99	Muito Bom	0,99
Valiantzas-3	0,65	0,94	-0,51*	0,96	Ótimo	0,91	0,48	0,97	-0,39*	0,98	Ótimo	0,97
Tabari	1,29	0,75	-1,18*	0,94	Bom	0,88	1,15	0,84	-1,06*	0,98	Muito Bom	0,96
Makkink	2,31	0,68	2,09*	0,96	Mediano	0,93	2,35	0,74	2,02*	0,99	Bom	0,97
	Santa Maria					Santa Rosa						
	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R ²	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	R ²
Trabert	2,54	0,54	-2,30*	0,69	Péssimo	0,48	2,64	0,53	-2,38*	0,70	Péssimo	0,49
Albrecht	2,07	0,64	-1,55*	0,61	Péssimo	0,37	2,00	0,65	-1,60*	0,67	Mau	0,44
Meyer	2,25	0,59	-2,02*	0,75	Mau	0,56	2,18	0,60	-1,90*	0,74	Mau	0,55
Brockamp	1,68	0,73	-1,17*	0,70	Sofrível	0,49	1,51	0,77	-0,95*	0,71	Sofrível	0,50
Rohwer	2,21	0,60	-1,95*	0,72	Mau	0,52	2,15	0,61	-1,86*	0,73	Mau	0,53
WMO-66	2,96	0,48	-2,73*	0,67	Péssimo	0,45	3,16	0,46	-2,92*	0,70	Péssimo	0,50
Mahringer	2,25	0,59	-2,05*	0,78	Mau	0,61	2,15	0,61	-1,87*	0,75	Mau	0,56
Harbeck	3,82	0,38	-3,56*	0,58	Péssimo	0,33	4,24	0,37	-3,97*	0,64	Péssimo	0,41
Schendel	0,88	0,88	0,18 ^{ns}	0,81	Bom	0,66	1,08	0,84	0,32*	0,75	Mediano	0,57
HS-1	0,76	0,93	0,19 ^{ns}	0,88	Muito Bom	0,78	1,11	0,87	0,23 ^{ns}	0,76	Bom	0,58
HS-2	0,70	0,94	0,07 ^{ns}	0,89	Muito Bom	0,80	1,08	0,88	0,17 ^{ns}	0,77	Bom	0,60
HS-3	1,03	0,86	-0,75*	0,88	Muito Bom	0,78	1,30	0,79	-0,81*	0,76	Sofrível	0,58
Baier-Rob	0,78	0,94	-0,14 ^{ns}	0,89	Muito Bom	0,79	1,06	0,89	0,07 ^{ns}	0,79	Bom	0,62
Romanenko	1,27	0,83	-0,77*	0,78	Mediano	0,61	1,16	0,86	-0,17 ^{ns}	0,75	Mediano	0,56
Camargo	1,41	0,77	-1,05*	0,78	Sofrível	0,61	1,72	0,69	-1,22*	0,67	Mau	0,44
Camargo mod	2,51	0,53	-2,31*	0,91	Mau	0,83	2,69	0,52	-2,45*	0,81	Mau	0,65
Turc	2,01	0,65	-1,94*	0,98	Mediano	0,95	2,03	0,67	-1,96*	0,98	Bom	0,95
Jensen-Haise	2,36	0,74	1,93*	0,97	Bom	0,94	2,41	0,75	1,99*	0,97	Bom	0,95
Stephens-Stew	0,62	0,96	-0,47*	0,97	Ótimo	0,94	0,72	0,95	-0,62*	0,97	Ótimo	0,95
Hargreaves	0,68	0,95	-0,56*	0,97	Ótimo	0,94	0,82	0,93	-0,73*	0,97	Ótimo	0,94
Milly-Dunne	1,08	0,89	0,98*	0,97	Ótimo	0,94	0,93	0,93	0,84*	0,98	Ótimo	0,96
Priestley-Taylor	1,14	0,89	1,02*	0,98	Ótimo	0,97	1,12	0,91	1,00*	0,99	Ótimo	0,98
Irmak	0,78	0,91	-0,60*	0,96	Ótimo	0,93	1,01	0,87	-0,82*	0,96	Muito Bom	0,93
Ritchie	0,59	0,96	-0,46*	0,97	Ótimo	0,94	0,72	0,95	-0,63*	0,98	Ótimo	0,95
Tanner-Pelton	2,99	0,63	2,82*	0,97	Mediano	0,94	2,97	0,66	2,79*	0,98	Mediano	0,96
Hicks-Hess	1,07	0,90	0,96*	0,98	Ótimo	0,97	1,01	0,92	0,91*	0,99	Ótimo	0,98
Souza-Silva	0,66	0,94	-0,59*	0,99	Ótimo	0,99	0,78	0,93	-0,70*	0,99	Ótimo	0,99
Valiantzas-1	0,84	0,92	-0,64*	0,93	Ótimo	0,86	1,03	0,88	-0,42*	0,81	Bom	0,65
Valiantzas-2	1,50	0,78	-1,46*	0,99	Muito Bom	0,98	1,54	0,78	-1,49*	0,99	Muito Bom	0,97

(continua)

Tabela 5 - continua

	Santa Maria					Santa Rosa						
	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	<i>R</i> ²	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	<i>R</i> ²
Valiantzas-3	0,50	0,97	-0,38*	0,98	Ótimo	0,95	0,56	0,97	-0,41*	0,97	Ótimo	0,94
Tabari	1,18	0,82	-1,04*	0,95	Muito Bom	0,90	1,48	0,76	-1,34*	0,95	Bom	0,90
Makkink	2,36	0,73	2,07*	0,97	Bom	0,94	2,34	0,75	2,07*	0,98	Bom	0,96
Vacaria												
	<i>EQM</i>	d	<i>EM</i>	r	c	<i>R</i> ²						
Trabert	2,54	0,49	-2,40*	0,82	Péssimo	0,68						
Albrecht	1,70	0,67	-1,50*	0,78	Sofrível	0,61						
Meyer	2,46	0,51	-2,32*	0,84	Mau	0,71						
Brockamp	1,64	0,69	-1,47*	0,83	Sofrível	0,68						
Rohwer	2,33	0,53	-2,20*	0,83	Mau	0,69						
WMO-66	2,90	0,44	-2,74*	0,81	Péssimo	0,66						
Mahringer	2,57	0,49	-2,44*	0,85	Mau	0,72						
Harbeck	3,62	0,36	-3,42*	0,77	Péssimo	0,59						
Schendel	0,92	0,82	-0,57*	0,84	Bom	0,71						
HS-1	0,72	0,92	0,10 ^{ns}	0,86	Muito Bom	0,73						
HS-2	0,68	0,93	-0,02 ^{ns}	0,87	Muito Bom	0,76						
HS-3	1,03	0,82	-0,80*	0,86	Bom	0,74						
Baier-Rob	0,85	0,91	-0,34*	0,88	Muito Bom	0,77						
Romanenko	1,64	0,69	-1,50*	0,85	Sofrível	0,73						
Camargo	1,71	0,64	-1,51*	0,78	Mau	0,61						
Camargo mod	2,27	0,53	-2,11*	0,91	Mau	0,82						
Turc	2,08	0,59	-2,02*	0,98	Sofrível	0,97						
Jensen-Haise	2,13	0,72	1,82*	0,97	Bom	0,93						
Stephens-Stew	0,59	0,95	-0,48*	0,96	Ótimo	0,93						
Hargreaves	0,68	0,93	-0,59*	0,96	Ótimo	0,93						
Milly-Dunne	1,47	0,79	1,42*	0,98	Muito Bom	0,95						
Priestley-Taylor	1,41	0,81	1,34*	0,99	Muito Bom	0,98						
Irmak	0,73	0,90	-0,61*	0,96	Ótimo	0,92						
Ritchie	0,50	0,96	-0,36*	0,96	Ótimo	0,93						
Tanner-Pelton	3,52	0,51	3,40*	0,98	Mau	0,95						
Hicks-Hess	1,37	0,82	1,31*	0,99	Muito Bom	0,98						
Souza-Silva	0,52	0,95	-0,45*	0,99	Ótimo	0,98						
Valiantzas-1	0,97	0,86	-0,87*	0,94	Muito Bom	0,88						
Valiantzas-2	1,59	0,71	-1,56*	0,99	Bom	0,98						
Valiantzas-3	0,62	0,94	-0,50*	0,96	Ótimo	0,92						
Tabari	1,11	0,80	-1,00*	0,94	Muito Bom	0,89						
Makkink	2,40	0,66	2,18*	0,97	Mediano	0,94						

* Significativo ao nível de 5% pelo teste t-Student; ^{ns} Não significativo.

de *ETo* ao norte da Espanha, demonstrando a importância em priorizar o uso de dados instrumentais de temperatura do ar.

Para os métodos baseados na radiação e classificados como ‘ótimo’, foi quase unânime *R*² acima de 0,90, aos quais são ratificados pelos valores dos índices de concordância (d) que apresentaram ajustes quase perfei-

tos ($d \geq 0,90$) entre a *ETo* estimada pelos referidos métodos com o de PM FAO-56. Destes métodos baseados na radiação com as referidas classificações, o *EQM* indica que a maioria apresentou uma variação média na estimativa da *ETo* inferior a 1 mm.dec (ou inferior a 10 mm no acumulado de 10 dias) em relação a *ETo* por PM FAO-56.

É compreensível o melhor desempenho dos métodos baseados na radiação, assim como encontrado em outros estudos (Tabari, 2010; Tabari *et al.*, 2013; Rigoni *et al.*, 2013; Irmack, 2016; Bourletsikas *et al.*, 2017; Macêdo *et al.*, 2017; Farzanpour *et al.*, 2019), tendo em vista que a evapotranspiração é controlada principalmente pela energia disponível para o processo de evaporação da água. Desta forma, não havendo impedimento de água disponível no solo, a evapotranspiração é diretamente proporcional a energia disponível (Reichardt, 1990). Isto foi atestado por Lemos Filho *et al.* (2010) que apesar de terem encontrado 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, apesar do menor número de opções para seu uso baseado nos desempenhos obtidos, em alguns municípios ainda pode-se estimar ETo, como pelo método de Brockamp e de Albrecht para Bagé e em Rio Grande, em que a ETo por PM FAO-56 explicou mais do que 75% ($R^2 > 0,75$) da variação na estimativa por estes dois métodos.

Na classificação dos 32 métodos avaliados, baseada na média do EQM obtida entre os municípios, houve maior presença de métodos baseados na temperatura do ar entre os 10 primeiros, em relação a análise na escala diária, mesmo que nas primeiras posições tenham predominado os métodos baseados na radiação, sendo o de Valiantzas-3, Ritchie, Stephens-Stew, Souza-Silva e o de Hargreaves, estados na 1º a 5º posição, respectivamente (Tabela 6). Nestes, houve uma variação média na estimativa da ETo de 0,59 mm.dec a 0,77 mm.dec em relação a ETo padrão. Comparativamente com a escala diária, a variação do EQM de alguns métodos foram maiores entre os municípios usados no estudo, como os de Brockamp (CV = 30,9%) e de Albrecht (CV = 35,2%), atestando terem sido os aerodinâmicos que tiveram desempenhos bem distintos entre os sete municípios.

Assim como na escala diária, houve uma diversidade na tendência das estimativas decendiais de ETo entre os métodos baseados na radiação, enquanto em alguns municípios como do Alegrete, Bagé, Passo Fundo, Rio Grande e Vacaria, houve uma tendência praticamente unânime dos métodos aerodinâmicos e baseados na temperatura em subestimar a ETo. A maioria dos métodos aerodinâmicos avaliados por Tabari *et al.* (2013) como o de Trabert, Mahringer e da WMO, também apresentaram tendência em subestimar a ETo em regiões úmidas. Uma possível explicação pode ser pelo fato de que o método padrão (PM FAO-56) considera dados de temperatura do ar e de radiação que tem como funções fornecerem a energia necessária para a mudança de estado físico da água do líquido para o vapor. Assim, em média, a ETo por PM FAO-56 tende a estimar maiores valores do que os aerodinâmicos, mas isto é algo que em estudos futuros poderá ser averiguado com mais ênfase, realizando como exemplo, análises de desempenho de acordo com a nebulosidade.

Tabela 6 - Média e coeficiente de variação (CV) do EQM entre os municípios do Rio Grande do Sul usados no estudo da ETo decendial estimada pelos 32 métodos aerodinâmicos (A), baseados na temperatura do ar (A) e na radiação (R).

Classificação	Método	Categoria	Média	CV
1	Valiantzas-3	R	0,59	12,8
2	Ritchie	R	0,65	13,1
3	Stephens-Stew	R	0,68	9,2
4	Souza-Silva	R	0,70	14,3
5	Hargreaves	R	0,77	10,0
6	HS-1	T	0,80	17,3
7	HS-2	T	0,80	17,3
8	Schendel	T	0,87	14,5
9	Irmak	R	0,92	16,1
10	Baier-Rob	T	0,95	13,9
11	Valiantzas-1	R	0,95	7,8
12	Romanenko	T	1,11	27,0
13	Hicks-Hess	R	1,15	11,9
14	Milly-Dunne	R	1,17	16,1
15	Priestley-Taylor	R	1,22	10,1
16	Brockamp	A	1,24	30,9
17	HS-3	T	1,28	15,4
18	Tabari	R	1,33	14,3
19	Albrecht	A	1,53	35,2
20	Valiantzas-2	R	1,58	4,1
21	Camargo	T	1,73	13,6
22	Rohwer	A	2,05	10,9
23	Turc	R	2,05	2,6
24	Meyer	A	2,19	8,1
25	Mahringer	A	2,33	7,9
26	Jensen-Haise	R	2,37	7,7
27	Trabert	A	2,39	9,9
28	Makkink	R	2,41	5,6
29	Camargo mod	T	2,74	10,8
30	WMO-66	A	2,90	7,3
31	Tanner-Pelton	R	3,26	8,6
32	Harbeck	A	3,96	7,1

lises de desempenho de acordo com a nebulosidade. Especificamente aos métodos baseados na radiação que tiveram um ‘ótimo’ desempenho, aqueles que subestimam a ETo possuem EM mais próximos de zero do que os que tendem a superestimar. Allen *et al.* (1998) detalhou que a ETo pelo método de Hargreaves tende a ser subestimada em situações quando a velocidade do vento é maior que 3 m.s^{-1} e de superestimar quando a umidade relativa é elevada.

Os gráficos de dispersão 1:1 elaborados para os dois métodos que obtiveram os maiores R^2 com o EM positivo e negativo mais próximo de zero de cada município, mostram que as referidas tendências são mais evidentes quanto maior for o valor estimado de ETo (Fig. 3). As exceções

podem ser aplicadas no método de Valiantzas-2, para os municípios de Bagé (Fig. 3d) e do Rio Grande (Fig. 3h),

em que a tendência de subestimar ficou em evidência para qualquer que seja o valor de ETo.

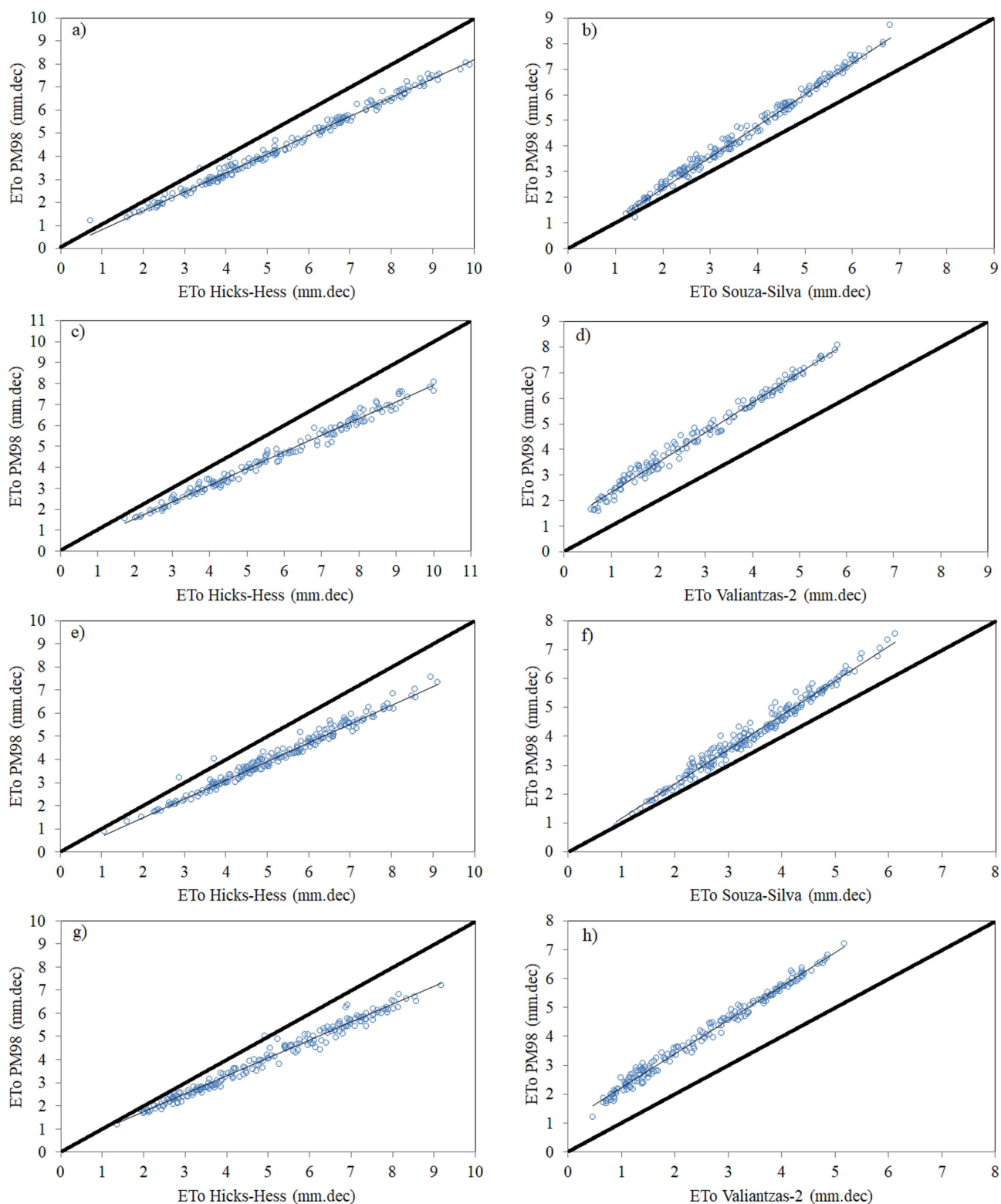


Figura 3 - Gráficos de dispersão 1:1 entre a ETo decenal (mm.dec) padrão (PM FAO98) e alguns métodos avaliados para os municípios do Alegrete (3a e 3b), Bagé (3c e 3d), Passo Fundo (3e e 3f), Rio Grande (3g e 3h), Santa Maria (3i e 3j), Santa Rosa (3k e 3l) e de Vacaria (3m e 3n).

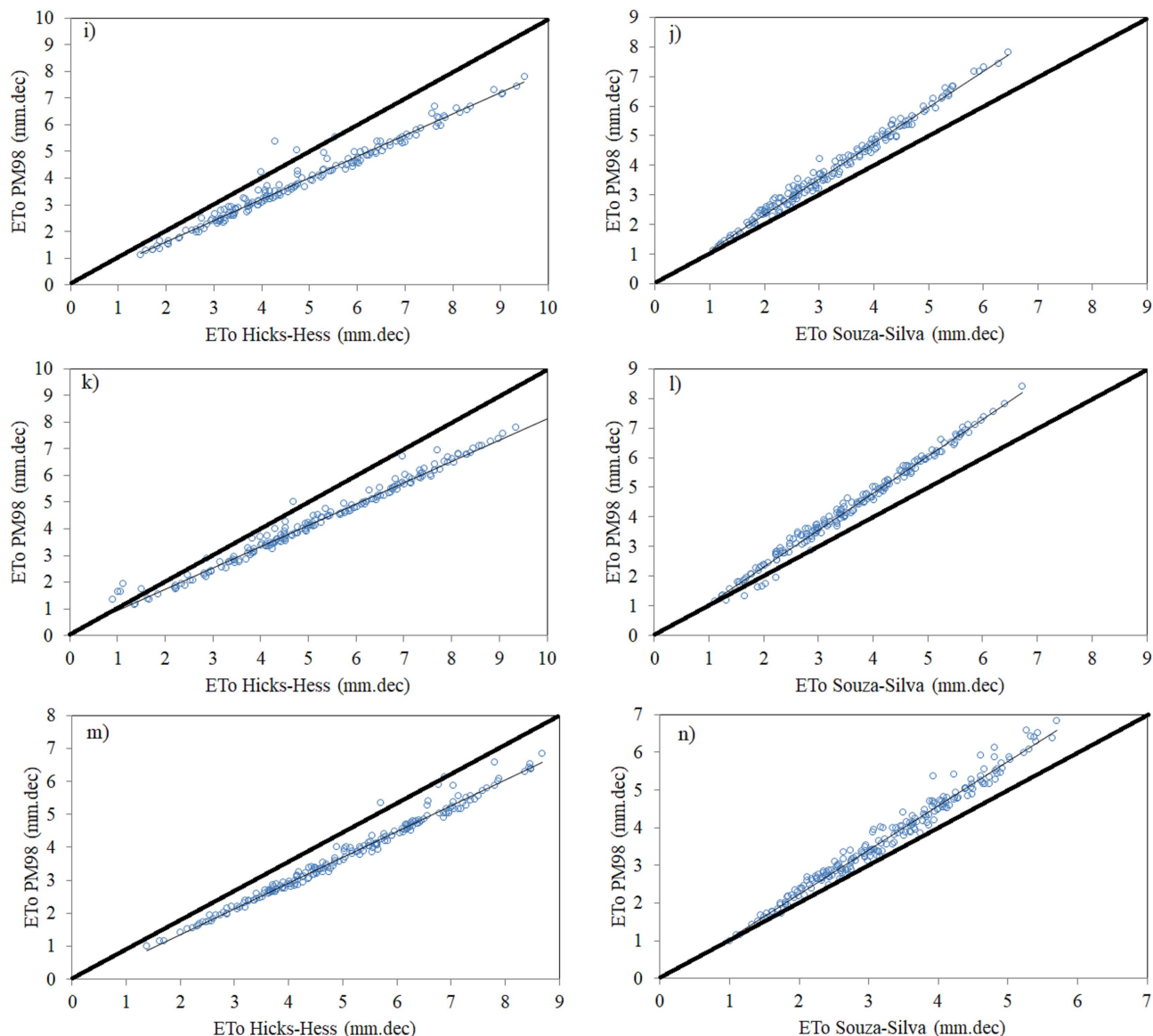


Figura 3 (cont.) - Gráficos de dispersão 1:1 entre a *ETo* decendial (mm.dec) padrão (PM FAO98) e alguns métodos avaliados para os municípios do Alegrete (3a e 3b), Bagé (3c e 3d), Passo Fundo (3e e 3f), Rio Grande (3g e 3h), Santa Maria (3i e 3j), Santa Rosa (3k e 3l) e de Vacaria (3m e 3n).

Diante de 32 métodos usados para avaliar os seus desempenhos na estimativa da *ETo* em substituição ao de PM FAO-56 devido à ausência de dados meteorológicos, há um bom número de opções para ambas as escalas de tempo estudadas e diferentes regiões climáticas do Rio Grande do Sul, principalmente, aqueles baseados na radiação. Para estes métodos, eventualmente ainda pode-se até melhorar as suas estimativas com a substituição da temperatura média pelas temperaturas mínima e máxima, conforme observado por Tabari *et al.* (2013) em regiões úmidas do Irã, que se assemelham ao clima do Rio Grande do Sul.

No entanto, mesmo em climas distintos ao do estado gaúcho, como o semi-árido encontrado em algumas regiões do Irã, Farzanpour *et al.* (2019) também encon-

traram que os métodos baseados na radiação e na temperatura do ar apresentaram melhores estimativas do que os aerodinâmicos.

Mesmo que na eventualidade em dado município do Rio Grande do Sul 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-56 estimando alguma das variáveis necessárias. Baseado no estudo realizado para o sul de Ontário, no Canadá, Sentelhas *et al.* (2010) explicaram que quando a umidade relativa e a velocidade do vento foram ausentes, para a primeira variável, os dados foram substituídos pelas normais climáticas da região, enquanto o déficit de pressão de vapor d'água foi estimado usando temperatura do ar. Mas quando os

autores consideraram a ausência de radiação líquida, o método de PM FAO-56 não foi bom o suficiente para estimativa da *ET_o*. 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-56 pode ser usado para todas as escalas de tempo analisadas no estudo, considerando as recomendações do boletim n.º 56 da FAO (Allen *et al.*, 1998) para estimar a velocidade do vento.

Inserido como mais uma opção para estimar *ET_o* com uma boa performance, consta a possibilidade de fazer uma calibração local com os métodos, conforme recomendado por Fooladmand e Haghighat (2007) e Sharafi e Ghalehi (2021) após estudos aplicados para diferentes regiões climáticas do Irã e para os métodos aerodinâmicos (Valipour, 2015). Da mesma forma, dentre 16 métodos avaliados, Djamanet *et al.* (2015) encontraram o de Valiantzas, de Trabert, Romanenko e de Mahringer como os mais precisos no vale do rio Senegal, principalmente quando foi feita a calibração. Morales-Salinas *et al.* (2017) afirmaram que após a calibração, a *ET_o* fornecida pelo método de Hargreaves apresentou um erro de apenas 5% em relação a de PM FAO-56 na região centro sul do Chile.

Para alguns locais no Brasil, a recalibração dos coeficientes feito por Monteiro *et al.* (2010) permitiu aumentar a sensibilidade dos métodos de *ET_o* ao efeito da amplitude térmica, reduzindo o erro sistemático, como nas estimativas feitas usando Hargreaves-Samani modificado. 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. Conclusões semelhantes quanto a melhora na estimativa de *ET_o* por Hargreaves-Samani após a sua calibração, também foram apresentadas por Ferreira *et al.* (2019), que ainda desenvolveram um programa computacional para realizar tal atividade.

4. Conclusões

Os métodos fundamentados na radiação são indicados para estimar a evapotranspiração de referência (*ET_o*) diária e decenal, especialmente o de Ritchie, Stephens-Stew, Souza-Silva, Valiantzas-3 e Hargreaves que tiveram um 'ótimo' desempenho em todos os municípios e os menores erros quadrático médios.

Na ausência de dados de radiação, há possibilidade de estimar a *ET_o* diária usando alguns métodos baseados na temperatura do ar, como o de Romanenko, apenas para o município de Bagé. Enquanto na escala decenal, pode-se recorrer ao método aerodinâmico de Brockamp, nos municípios de Bagé e do Rio Grande e nos métodos fundamentados na temperatura, como de Hargreaves-Samani 1 e 2 e de Baier-Rob em todos os municípios, exceto de Santa Rosa.

Agradecimentos

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

Referências

- ALENCAR, L.P.; SEDIYAMA, G.C.; WANDERLEY, H.S.; ALMEIDA, T.S.; DELGADO, R.C. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades no norte de Minas Gerais. **Eng. Agric.**, v. 19, n. 5, p. 437-449, 2011.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration. Irrigation and Drainage Paper n. 56**. Rome: FAO, 1998.
- AMIRASHAYERI, A.; BEHMANESH, J.; REZAVERDINEJAD, V.; ATTAR, N.F. Evapotranspiration estimation using hybrid and intelligent methods. **Soft Comput.**, v. 27, p. 9801-9821, 2023. [doi](#)
- ARAÚJO, W.F.; CONCEIÇÃO, M.A.F.; VENÂNCIO, J.B. Evapotranspiração de referência diária em Boa Vista (RR) com base na temperatura do ar. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 155, 2012.
- BOURLETSIKAS, A.; ARGYROKASTRITIS, I.; PROUTSOS, N. Comparative evaluation of 24 reference evapotranspiration equations applied on the evergreen-broad leaved forest. **Hydrol. Res.**, v. 49, n. 4, p. 1028-1041, 2017. [doi](#)
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Rev. Bras. de Agrometeorol.**, v. 5, p. 89-97, 1997.
- CUNHA, F.F.; MAGALHÃES, F.F.; CASTRO, M.A. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul - MS. **Eng. Agric.**, v. 21 n. 2, p. 159-172, 2013. [doi](#)
- DJAMAN, K.; BALDE, A.B.; SOW, A.; MULLER, B.; IRMAK, S.; *et al.* Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. **J. Hydrol. Reg. Stud.**, v. 3, p. 139-159, 2015. [doi](#)
- DROOGERS, P.; ALLEN, R.G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. **Irrig. Drain. Syst.**, v. 16, p. 33-45, 2002.
- FARZANPOUR, H.; SHIRI, J.; SADRAADDINI, A.A.; TRAJKOVIC, S. Global comparison of 20 reference evapotranspiration equations in a semi-arid region of Iran. **Hydrol. J.**, v. 50, n. 1, p. 282-300, 2019. [doi](#)
- FERREIRA, L.B.; CUNHA, F.F.; SEDIYAMA, G.C.; CAMPOS, F.B. HS Cal software for the calibration of the Hargreaves-Samani equation. **Pesqui. Agropecu. Bras.**, v. 54, e00226, 2019. [doi](#)
- FOOLADMAND, H.R.; HAGHIGHAT, M. Spatial and temporal calibration of Hargreaves equation for calculating monthly *ET_o* based on Penman-Monteith method. **Irrig. Drain.**, v. 56, p. 39-449, 2007.
- IRMAK, S.; IRMAK, A.; ALLEN, R.G.; JONES, J.W. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. **J. Irrig. Drain. Eng. ASCE**, v. 129, n. 5, p. 336-347, 2003.

- JUNG, M.; REICHSTEIN, M.; CIAIS, P.; SENEVIRATNE, S.I.; SHEFFIELD, J.; *et al.* Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. **Nature**, 467, p. 951-954, 2010.
- KARTAL, V. Prediction of monthly evapotranspiration by artificial neural network model development with Levenberg-Marquardt method in Elazig, Turkey. **Environ. Sci. Pollut. Res.**, v. 31, p. 20953-20969, 2024. [doi](#)
- LANDERAS, G.; ORTIZ-BARREDO, A.; LÓPEZ, J.J. Comparison of artificial neural network model and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). **Agric. Water Manag.**, v. 95, n. 5, p. 553-565, 2008.
- LEMOS FILHO, L.C.A.; CARVALHO, L.G.; EVANGELISTA, A.W.P.; ALVES JÚNIOR, J. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Rev. Bras. de Eng. Agrícola e Ambient.**, v. 14, n. 2, p. 1294-1303, 2010. [doi](#)
- MACÊDO, K.G.; ARRAES, F.D.D.; OLIVEIRA, W.C.; LIMA JÚNIOR, J.C.; ARAÚJO, Y.R. Estimativa da evapotranspiração de referência utilizando modelos com base na temperatura do ar e radiação solar global para o estado de Goiás. **Eng. Agric.**, v. 25, n. 6, p. 540-548, 2017. [doi](#)
- MONTEIRO, J.E.B.A. Avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial diária em regiões brasileiras. In: **Anais 11º Congresso Brasileiro de Meteorologia**, CD-ROM, Belém, 2010.
- MONTEIRO, J.E.B.A.; CUADRA, S.V.; OLIVEIRA, A.F.; NAKAI, A.M.; MACIEL, R.J.S. Estimativa da evapotranspiração diária baseada apenas na temperatura. **Agrometeoros**, v. 25, n. 1, p. 227-236, 2017. [doi](#)
- MORALES-SALINAS, L.; ORTEGA-FARÍAS, S.; RIVEROS-BURGOS, C.; NEIRA-ROMÁN, J.; CARRASCO-BENAVIDES, M.; *et al.* Monthly calibration of Hargreaves-Samani equation using remote sensing and Topoclimatology in central-southern Chile. **Int. J. Remote Sens.**, v. 38, p. 7497-7513, 2017. [doi](#)
- PEREIRA, A.R.; SEDIYAMA, G.C.; VILLA NOVA, N.A. **Evapotranspiração**. Campinas: Fundag, 2013.
- REICHARDT, K. **A Água em Sistemas Agrícolas**. São Paulo: Ed. Manole, 1990.
- SÖRENSSON, A.A.; RUSCICA, R.C., Intercomparison and uncertainty assessment of nine evapotranspiration estimates over South America. **Water Resour. Res.**, v. 54, p. 2891-2908, 2018. [doi](#)
- RIGONI, E.R.; OLIVEIRA, G.Q.; BISCARO, G.A.; QUEIRÓZ, M.V.B.M.; LOPES, A.S. Desempenho sazonal da evapotranspiração de referência em Aquidauana, MS. **Eng. Agric.**, v. 21, n. 6, p. 547-562, 2013. [doi](#)
- ROSSATO, M.S. Os climas do Rio Grande do Sul: uma proposta de classificação climática. **Entre-Lugar**, v. 11, n. 22, p. 57-85, 2020. [doi](#)
- SENTELHAS, P.C.; GILLESPIE, T.J.; SANTOS, E.A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. **Agric. Water Manag.**, v. 97, p. 635-644, 2010. [doi](#)
- SHARAFI, S.; GHALENI, M.M. Evaluation of multivariate linear regression for reference evapotranspiration modeling in different climates of Iran. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 143, p. 1409-1423, 2021. [doi](#)
- SILVA, G.H.; DIAS, S.H.B.; FERREIRA, L.B.; SANTOS, J.E.O.; CUNHA, F.F. Performance of different methods for reference evapotranspiration estimation in Jaíba, Brazil. **Rev. Bras. de Eng. Agrícola e Ambient.**, v. 22, n. 2, p. 83-89, 2018. [doi](#)
- SOUZA, L.S.B.; SILVA, M.T.L.; ALBA, E.; MOURA, M.S.B.; CRUZ NETO, J.F.; *et al.* New method for estimating reference evapotranspiration and comparison with alternative methods in a fruit-producing hub in the semi-arid region of Brazil. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 149, n. 1-2, p. 593-602, 2022. [doi](#)
- TABARI, H. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. **Water Resour. Manage.**, v. 24, p. 2311-2337, 2010. [doi](#)
- TABARI, H.; GRISMER, M.; TRAJKOVIC, S. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. **Irrig. Sci.**, v. 31, p. 107-117, 2013.
- TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R.; ROCHA, F.; SANTOS, L. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis - BA. **Rev. Caatinga**, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.
- TANAKA, A.A.; SOUZA, A.P.; KLAR, A.E.; SILVA, A.C.; GOMES, A.W.A. Evapotranspiração de referência estimada por modelos simplificados para o Estado do Mato Grosso. **Pesqui. Agropecu. Bras.**, v. 51, n. 2, p. 91-104, 2016. [doi](#)
- VALIPOUR, M. Calibration of mass transfer-based models to predict reference crop evapotranspiration. **Appl. Water Sci.**, v. 7, n. 2, p. 625-635, 2015. [doi](#)
- VENANCIO, L.P.; CUNHA, F.F.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; EUGENIO, F.C.; *et al.* Penman-Monteith with missing data and Hargreaves-Samani for ETo estimation in Espírito Santo State, Brazil. **Rev. Bras. de Eng. Agrícola e Ambient.**, v. 23, n. 3, p. 153-159, 2019. [doi](#)
- YANG, Y.; CHEN, R.; HAN, C.; LIU, Z. Evaluation of 18 models for calculating potential evapotranspiration in different climatic zones of China. **Agric. Water Manag.**, v. 244, 106545, 2021. [doi](#)
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Phys Geogr.**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.



License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.