



MODELOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA A REGIÃO SUL DO TRIÂNGULO MINEIRO, BRASIL

Reference evapotranspiration estimate models for the southern region of the Triângulo Mineiro, Brazil

Modelos de estimación de evapotranspiración de referencia para la región sur del Triângulo Mineiro, Brasil

Giovani Bonício Rosa  

Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade Frutal
giovanirosa0410@gmail.com

Daniela Fernanda da Silva Fuzzo  

Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade Frutal
daniela.fuzzo@uemg.br

João Alberto Fischer Filho  

Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, Unidade Frutal
joao.fischer@uemg.br

Resumo: Objetivou-se determinar modelos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para a região sul do Triângulo Mineiro. Para calcular as estimativas de ET_o foram utilizados dados diários do INMET para Frutal, Conceição das Alagoas e Uberaba-MG. Foram testados seis modelos para determinar a ET_o e assim compará-los com o modelo de Penman e Monteith (PM), que foi considerado padrão. Após o cálculo das estimativas de ET_o diária, foi aplicada análise de regressão, utilizando um modelo linear comparando o modelo de PM com os demais modelos, em seguida foram calculados os índices de correlação, erro absoluto, coeficiente de determinação e raiz quadrada do erro médio, selecionando o modelo superior para a região. O acumulado de ET_o anual para as cidades de Conceição das Alagoas, Uberaba e Frutal-MG, foram respectivamente, iguais a 1.876,4; 1.821,7 e 1.784,6 mm. Em função de caracterizar-se por uma região de clima tropical, a ET_o apresenta valores elevados, com média igual a 5,0 mm dia⁻¹. Para a cidade de Frutal, os modelos que mais se aproximaram do modelo de PM foram os de Hargreaves e Samani e o de Turc. Para Uberaba, o modelo de Thornthwaite caracterizou-se por subestimar a ET_o. E Conceição das Alagoas, o mais próximo de PM, foi o modelo de Hargreaves e Samani. Dentre os modelos avaliados verificou-se que o melhor desempenho foi obtido com o método de Hargreaves e Samani, apresentando maior acurácia e precisão quando comparado aos demais métodos para o Triângulo Mineiro Sul, sendo este recomendado para utilização na região.

Palavras-chave: Agroclimatologia. Demanda hídrica. ETo. Penman e Monteith.

Abstract: This study aims to evaluate reference evapotranspiration (ETo) estimation models for the southern region of Triângulo Mineiro – Brazil. In order to calculate the ETo estimates, daily data from the National Institute of Meteorology (INMET) were used for the regions of Frutal, Conceição das Alagoas and Uberaba – Minas Gerais (MG). Six models were tested to determine the ETo and compared with the Penman and Monteith (PM) method, which was considered as the standard. After calculating the daily ETo estimates, regression analysis was applied using a linear model comparing the PM method with the other models, and the indices of correlation, absolute error, coefficient of determination and root mean square error were subsequently calculated in order to select the superior model for the region. The accumulated annual ETo for the cities of Conceição das Alagoas, Uberaba and Frutal – MG were, respectively, equal to 1876.4; 1821.7 and 1784.6 mm. As the region is characterized by a tropical climate, ETo presents high values, with an average of 5.0 mm a day⁻¹. For the city of Frutal, the models that came closest to the PM model were the Hargreaves and Samani and Turc methods. For Uberaba, the Thornthwaite model was characterized by underestimating the ETo. For Conceição das Alagoas, the closest to PM was the method of Hargreaves and Samani. Among the evaluated models, it was found that the best performance was obtained with the Hargreaves and Samani method, which presented greater accuracy and precision when compared to other methods for the Triângulo Mineiro Sul region, and is thus recommended for use in the area.

Keywords: Agroclimatology. Water demand. ETo. Penman and Monteith.

Resumen: El objetivo fue determinar modelos de estimación de evapotranspiración de referencia (ETo) para la región sur del Triângulo Mineiro. Para calcular las estimaciones de ETo, se utilizaron datos diarios del INMET para Frutal, Conceição das Alagoas y Uberaba-MG. Se probaron seis modelos para determinar la ETo y así compararlos con el modelo de Penman y Monteith (PM), que se consideró estándar. Después de calcular las estimaciones diarias de ETo, se aplicó el análisis de regresión usando un modelo lineal comparando el método PM con los otros modelos, luego se calcularon los índices de correlación, el error absoluto, el coeficiente de determinación y la raíz cuadrada del error medio, seleccionando el modelo superior para la región. Las ETo anuales acumuladas para los municipios de Conceição das Alagoas, Uberaba y Frutal-MG, fueron 1.876,4; 1.821,7 y 1.784,6 mm, respectivamente. Como se caracteriza por ser una región de clima tropical, la ETo presenta valores altos, con un promedio igual a 5,0 mm día⁻¹. Para la ciudad de Frutal, los modelos que más se acercaron al modelo PM fueron Hargreaves y Samani y Turc. Para Uberaba, el modelo de Thornthwaite se caracterizó por subestimar la ETo. Y Conceição das Alagoas, el más cercano a PM fue el modelo de Hargreaves y Samani. Entre los modelos evaluados, se verificó que el mejor desempeño obtenido fue con el modelo de Hargreaves y Samani, presentando mayor exactitud y precisión cuando fue comparado con los demás métodos para el Triângulo Mineiro Sul, por lo cual es recomendado para uso en la región.

Palabras clave: Agroclimatología. Demanda de agua. ETo. Penman y Monteith.

Submetido em: 06/04/2023

Aceito para publicação em: 03/07/2023

Publicado em: 15/07/2023

1. INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos tem sido uma das grandes problemáticas mundiais, em função do aumento do consumo da água. Entre os diferentes parâmetros climáticos que auxiliam na gestão da água destaca-se a evapotranspiração, que é largamente utilizada como critério de demanda hídrica em diferentes áreas, como ecologia, meteorologia, agronomia e hidrologia (XIANG et al., 2020).

A evapotranspiração de referência (ET_o) é um meio de quantificar a necessidade hídrica de qualquer espécie vegetal, em função de indicar a perda de água de uma superfície vegetada, em crescimento ativo que cobre totalmente o solo, sem restrição hídrica, apresentando importante papel em estudos relacionados ao manejo de água (Pereira et al., 1997; Allen et al., 1998). Diante de sua importância, a quantificação da ET_o é fundamental para definições de manejo que envolvem a dinâmica da água.

O conhecimento sobre o nível de ET_o para determinar o uso da água na agricultura é tão importante quanto o gerenciamento eficiente dos recursos hídricos (AHMADI; FOOLADMAND, 2008), particularmente para promover um desenvolvimento sustentável. Porém, a medição direta de ET_o no campo é difícil e onerosa, uma vez que é um processo de transferência de vapor sendo afetado por fatores dinâmicos, como parâmetros climáticos, características das culturas e manejo e aspectos ambientais (ALLEN et al., 1998), diante disso modelos que estimam a ET_o são utilizados para contornar tais problemas.

Existem diversos modelos para determinação da ET_o, como Hargreaves e Samani, Camargo, Jobson, Benevides e Lopez, Thornthwaite, Turc e Penman e Monteith entre outros, alguns desses modelos requerem maior número de parâmetros e outros mais simples com a necessidade de poucos dados meteorológicos. O modelo de Penman e Monteith foi escolhido como padrão por apresentar superioridade aos demais métodos, aproximar da evapotranspiração do padrão grama e requerer vários parâmetros que não estão prontamente disponíveis. Por outro lado, há aqueles mais simples, exigindo apenas a temperatura do ar (Jobson) e, adicionalmente, a latitude do ponto específico (Hargreaves e Samani) (VEGA; JARA, 2009).

Neste contexto, diversos trabalhos têm sido relatados na literatura comparando métodos de estimativa de ET_o em relação ao modelo de Penman e Monteith. Entre eles,

Oliveira et al. (2011) observaram resultados aceitáveis de acurácia dos métodos de Hargreaves e Samani e Camargo, para a região de Aquidauana/MS. Na região de Jaboticabal/SP, Caporusso e Rolim (2015) verificaram que o método de Priestley e Taylor apresentou maior acurácia para determinação da ETo em diferentes escalas de tempo. Ao comparar métodos de estimativa da ETo em regiões citrícolas paulistas, Palaretti et al. (2014) observam que o modelo de Hargreaves e Samani superestimou a ETo em quase todas as regiões estudadas, e o método de Blaney e Criddle-FAO, subestimou a ETo em todas as regiões estudadas.

Ao identificar modelos precisos que necessitam de menos dados meteorológicos pode-se facilitar as diferentes atividades, principalmente em regiões em que há dificuldade de acesso a dados das condições climáticas (OLIVEIRA et al., 2001). É sábio que o uso de modelos de estimativa de ETo não têm aplicabilidade global, assim justifica-se realizar estudos regionais para ajustar modelos que melhor adequem as condições climáticas locais (LIMA et al., 2019), de modo a possibilitar maior preservação dos recursos naturais e melhorar o gerenciamento das atividades, em especial aquelas que utilizam a água.

Diante disso, objetivou-se estudar a variação anual da evapotranspiração de referência (ETo) e determinar diferentes modelos de estimativa da ETo para a região sul do Triângulo Mineiro.

2. METODOLOGIA

Para o presente estudo utilizou-se dados meteorológicos diários obtidos de estações meteorológicas pertencentes à rede nacional de observações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados foram coletados para as três cidades localizadas na região sul Triângulo do Mineiro que possuem ou possuíam estações (Tabela 1).

Tabela 1- Descrição das estações meteorológicas de superfície.

Estação	Coordenadas	Altitude (m)	Operação
Frutal	20°01'48" S 48°55'48" O	543,7	Estação convencional com encerramento das operações em 2013
Conceição das Alagoas	19°59'91" S 48°09'06" O	573,0	Estação automática em operação
Uberaba	19°42'36" S 47°29'24" O	778,0	Estação automática em operação desde 18 de maio de 2017

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Os dados climáticos coletados na estação e utilizados no trabalho foram: precipitação total diária, mm; pressão atmosférica média diária, atm; temperatura do ponto de orvalho média diária, °C; temperatura mínima, média e máxima diária, °C; umidade relativa do ar mínima e média, %; velocidade média do vento diária, m/s.

Na estação do INMET, a temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) é colhida a 00:00 UTC; a temperatura mínima (T_{min}) é colhida nas 12:00 UTC; a temperatura média (T_{med}), diária, é obtida através da soma da temperatura, as 12:00 UTC, mais duas vezes a temperatura as 24:00 UTC, mais a temperatura máxima, mais a temperatura mínima, dividindo-se por cinco. O sensor de velocidade do vento fica a 10 m de altura e foi realizada a conversão da velocidade do vento para altura de 2 m conforme Allen et al. (1998), a umidade relativa média diária é obtida pela soma das umidades relativas, às 12:00, 18:00 e duas vezes, as 24:00 UTC, dividindo-se por quatro, a chuva diária acumulada é colhida nas 12:00 UTC.

Para serem calculadas as estimativas de ETo foram utilizados dados diários de 1996 a 2005 para Frutal, de 2011 a 2020 para Conceição da Alagoas e de 2017 a 2020 para Uberaba. Os dados climáticos foram checados utilizando o *software* Clima (FARIA et al., 2003), por meio do qual foram realizadas correções de possíveis erros e falhas.

Foram testados seis modelos para determinar a ETo e assim compará-los com o modelo de Penman e Monteith descritos a seguir.

a) Penman and Monteith (ALLEN et al., 1998)

$$E_{To} = \frac{0,408 \times s \times (R_n - G) + \frac{\gamma \times 900 \times U_2 \times (e_s - e_a)}{T + 273}}{s + \gamma \times (1 + 0,34 \times U_2)}$$

$$s = \frac{4098 \times e_s}{(T + 273)^2}$$

$$e_a = \frac{UR \times e_s}{100}$$

$$e_s = 0,6108 \times e^{\frac{17,27 \times T}{237,3 + T}}$$

b) Hargreaves e Samani (1985) (apud MEDEIROS, 1998)

$$E_{To} = 0,0023 \times \frac{Q_o}{2,45} \times (T_{\text{max}} - T_{\text{mín}})^{0,5} \times (T + 17,8)$$

c) Camargo (1971) (apud PEREIRA et al., 2002)

$$ET_o = 0,01 \times \frac{Q_o}{2,45} \times T \times ND$$

$$hn = \arccos(-\tan\theta \times \tan\delta) \quad Q_o = 37,5 \times DR \times \left[\left(\frac{\pi}{180} \right) \times hn \times \sin\theta \times \sin\delta + \cos\delta \times \sin hn \right]$$

$$DR = 1 + 0,33 \times \cos \left(360 \times \frac{NDA}{365} \right) \quad \delta = 23,45 \times \sin \left[\left(\frac{360}{365} \right) \times NDA \times 80 \right]$$

d) Jobson (apud BOWIE et al., 1985)

$$ET_o = 3,01 + 1,12 \times U_2 \times (es - ea)$$

e) Benevides e Lopez (1970) (apud MEDEIROS, 1998)

$$ET_o = 1,21 \times 10^{\frac{7,5 \times T}{237,5 \times T}} \times (1 - 0,01 \times UR) + 0,21 \times T - 2,3$$

f) Thornthwaite (1948) (apud PEREIRA et al., 2002)

$$ET_o = ET_p \times Cor \quad Cor = \left(\frac{ND}{30} \right) \times \left(\frac{N}{12} \right) \quad I = (0,2 \times T_n)^{1,514}$$

$$ET_p = -415,85 + 23,24 \times T - 0,43 \times T^2 \quad \text{para } T \geq 26,5^\circ\text{C}$$

$$ET_p = 16 \times \left(10 \times \frac{T}{I} \right) \quad \text{para } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 26,5^\circ\text{C}$$

h) Turc (1961) (apud MEDEIROS, 1998)

$$ET_o = 0,013 \times \left(\frac{T_{\text{máx}}}{T_{\text{máx}} + 15} \right) \times \left(\frac{Q_g \times 100}{4,18} + 50 \right)$$

Onde: ET_o – evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); s – declividade da curva de pressão de vapor no ponto correspondente a temperatura ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n – balanço de radiação ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$); G – fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$); γ – é uma constante psicrométrica igual a $0,063 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; U_2 – velocidade do vento (m s^{-1}) em uma altura de 2 m; es – pressão de saturação de vapor (kPa); ea – pressão parcial de vapor (kPa); T – temperatura média do ar

(°C); ND – número de dias; N – fotoperíodo (horas); Tn – temperatura mensal média (°C); I – índice de calor mensal (°C); Q_o – radiação solar extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); hn – hora do nascer do sol; ϕ – latitude (°); δ – declinação solar (°); DR – distância relativa entre o Sol e a Terra; NDA – dia juliano; Q_g – radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

A ETo obtida por Penman e Monteith é considerada como padrão para comparação com os demais métodos, por ser considerada o modelo mais preciso, em razão de integrar maior quantidade de parâmetros climatológicos (SYPPERRECK et al., 2008) e apresentar superioridade aos outros métodos.

Após o cálculo das estimativas de ETo diária, para cada cidade e para os diversos anos de análise, foi aplicada análise de regressão utilizando um modelo linear comparando o modelo de PM com os demais modelos de ETo. Foram geradas equações pela comparação, sendo os dados obtidos por PM a variável dependente (x) e as outras equações a variável independente (y).

Foram calculados os índices de correlação (r), os quais foram classificados quanto a amplitude seguindo a classificação proposta por Hopkins (2000) (Tabela 2).

Tabela 2- Descrição das estações meteorológicas de superfície.

Coeficiente de correlação (r)	Classificação
0,00 – 0,10	Muito Baixa
0,10 – 0,30	Baixa
0,30 – 0,50	Moderada
0,50 – 0,70	Alta
0,70 – 0,90	Muito Alta
0,90 – 1,00	Quase Perfeita

Fonte: Hopkins (2000).

As seguintes análises estatísticas foram realizadas para avaliar a precisão e para comparação entre os valores estimados pelos diferentes métodos com os valores obtidos por PM: acurácia utiliza o erro absoluto (Ea), precisão foi medida pelo coeficiente de determinação (R^2), e tendência avaliada pela raiz quadrada do erro médio (RMSE). O Ea e RMSE foram calculados com as equações 1 e 2, respectivamente:

$$(1) \quad E_a = \frac{\sum |Y_{obs} - Y_{est}|}{N}$$

$$(2) \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Y_{obs} - Y_{est})^2}{N}}$$

Em que: Y_{obs} – ETo observada usando o modelo padrão de Penman e Monteith; Y_{est} – ETo estimada usando diferentes modelos; N – número de observações.

A partir destes valores obtidos de acurácia, tendência e precisão, foi selecionado o modelo que apresenta superioridade e aproxima-se ao modelo padrão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

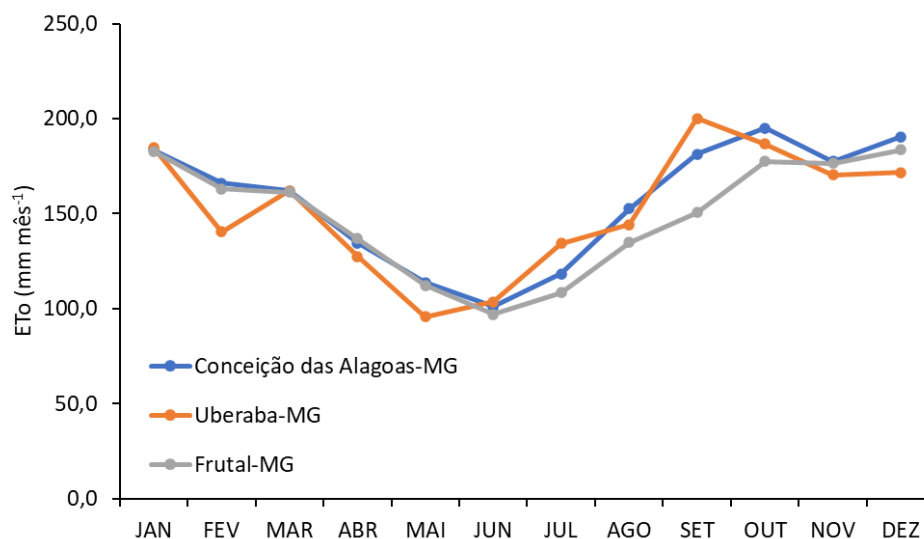
3.1. Variação anual e diária da evapotranspiração de referência (ETo)

Para estudar a variação anual e diária da evapotranspiração de referência, foi adotado o modelo padrão proposto por Penman e Monteith. O acumulado de ETo anual para as cidades de Conceição das Alagoas, Uberaba e Frutal, foram respectivamente, iguais a 1876,4; 1821,7 e 1784,6 mm. Em função de caracterizar-se por uma região de clima tropical, a ETo apresenta valores elevados, com média de 1827,6 mm ano⁻¹ para a região do Triângulo Mineiro Sul.

Ao analisar a ETo diária, o valor médio da região foi de 5,0 mm dia⁻¹, sendo as médias de cada cidade iguais a 5,14 mm dia⁻¹ para Conceição das Alagoas, 4,99 mm dia⁻¹ para Frutal e 4,89 mm dia⁻¹ para Uberaba, MG. Resultados semelhantes foram obtidos por Pinheiro et al. (2019) ao estudar ETo para algumas localidades de Minas Gerais, encontrado valores extremos de 4,85 mm dia⁻¹ em Espinosa e 2,81 mm dia⁻¹ em Lambari, pelo modelo de Penman e Monteith, e 5,14 mm dia⁻¹ em Mocaminho pelo método Hargreaves e Samani.

As cidades estudadas apresentaram valores de ETo mensal próximos, em razão da proximidade geográfica. Tal fato pode ser evidenciando ao observar que os meses com maiores acumulados de ETo ocorreram em outubro, setembro e dezembro, respectivamente para Conceição das Alagoas, Uberaba e Frutal-MG. Os menores valores acumulados de ETo foram de 101,0; 95,8; 97,0 mm mês⁻¹ respectivamente para Conceição das Alagoas, Uberaba e Frutal (Figura 1).

Figura 1 - Variação mensal da evapotranspiração de referência (ET_o), por Penman e Monteith, para Frutal, Conceição das Alagoas e Uberaba-MG, Brasil.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A variação do somatório da ET_o mensal para a região apresenta tendência de maiores valores acumulados nos meses de verão e nos meses de inverno há um decréscimo do somatório da ET_o. Menores valores de ET_o, durante o inverno, ou seja, na estação seca, podem ser explicados pelas menores temperaturas, o ar mais seco e menor radiação, além de ser uma característica da limitação de água nesta estação neste dossel (GOULART, et al. 2015).

Matzenauer et al. (2008) avaliaram a evapotranspiração de referência (ET_o) na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul. Os autores determinaram a ET_o para as localidades de Passo Fundo, Cruz Alta e Júlio de Castilhos, e observaram, respectivamente, valores mais elevados nos meses de outubro, novembro e dezembro, se assemelhando aos dados encontrados no presente trabalho.

3.2. Modelos de estimativa de evapotranspiração de referência (ET_o)

Foram calculados e comparados os modelos de determinação da ET_o para a região do Triângulo Mineiro Sul. As análises estatísticas são apresentadas na Tabela 3, em comparação com o modelo padrão de Penman e Monteith.

Tabela 3- Acurácia, precisão e tendência dos modelos de evapotranspiração de referência em relação ao modelo padrão de Penman e Monteith para o Triângulo Mineiro Sul, Brasil.

Modelos	R ² (%)	r	RMSE (mm dia ⁻¹)	Ea (mm dia ⁻¹)
Frutal-MG				
Benevidez e Lopes	60,6	0,778	1,89	1,73
Hargreaves e Samani	77,6	0,881	0,64	0,47
Camargo	83,4	0,916	1,37	1,29
Jobson	19,6	0,442	0,69	1,11
Thornthwaite	83,1	-0,911	0,73	1,45
Turc	73,1	0,855	0,43	0,69
Uberaba-MG				
Benevidez e Lopes	78,6	0,886	1,29	2,14
Hargreaves e Samani	75,1	0,866	0,42	0,55
Camargo	66,2	0,814	1,02	1,63
Jobson	33,8	0,582	0,70	1,08
Thornthwaite	69,2	-0,832	0,78	1,48
Turc	57,8	0,760	0,85	1,30
Conceição das Alagoas-MG				
Benevidez e Lopes	76,0	0,879	2,12	2,04
Hargreaves e Samani	80,7	0,898	1,02	0,48
Camargo	72,8	0,853	1,68	1,59
Jobson	35,5	0,595	1,15	1,01
Thornthwaite	81,7	0,904	1,00	0,86
Turc	65,6	0,810	0,73	0,58

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Entre os modelos estudados para as três localidades, todos os modelos, com exceção o de Jobson, foram caracterizados com correlação (r) muito alta ou quase perfeita, ou seja, os modelos apresentaram convergência com o modelo padrão. O método de Jobson foi desenvolvido para uma região que apresenta invernos levemente chuvosos e verões secos (JOBSON, 1980), ou seja, características climáticas diferentes ao do Triângulo Mineiro, o que interfere na qualidade do modelo na região de estudo.

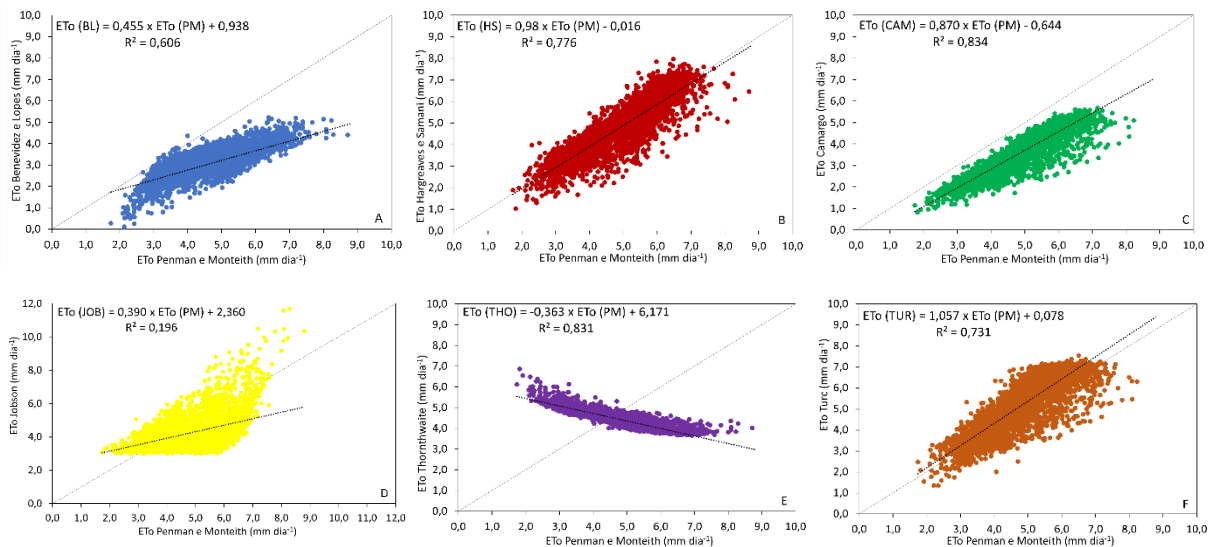
O modelo de Thornthwaite foi o único a apresentar correlação negativa, para as cidades de Frutal e Uberaba-MG, ou seja, tal modelo tende a subestimar a ETo quando utilizado para a região. De acordo com Tucci (2004) a equação de Thornthwaite deve ser utilizada com cautela, particularmente em climas de verões úmidos e invernos secos, como

ocorre para a região do Triângulo Mineiro Sul, sendo que subestima com frequência a evapotranspiração por não considerar o poder evaporante do ar.

A partir das análises realizadas dos modelos estudados, para Frutal-MG sobressaíram-se de forma positiva em relação a correlação e precisão os modelos de Hargreaves e Samani, de Camargo, de Thornthwaite e de Turc, com coeficientes de determinação (R^2), superiores a 70%. Entretanto, os modelos de Camargo e Thornthwaite apresentaram erros superiores a 1 mm dia⁻¹, o que reduz a acurácia da estimativa (Tabela 3).

Associações feitas para os valores diários da evapotranspiração de referência dos seis métodos comparados com o modelo padrão de Penman e Monteith para Frutal-MG são apresentadas na Figura 2.

Figura 2 - Relações entre os valores diários da evapotranspiração de referência calculada pela equação de Penman e Monteith e: (A) Benevides e Lopes, (B) Hargreaves e Samani, (C) Camargo, (D) Jobson, (E) Thornthwaite e (F) Turc para Frutal-MG, Brasil.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

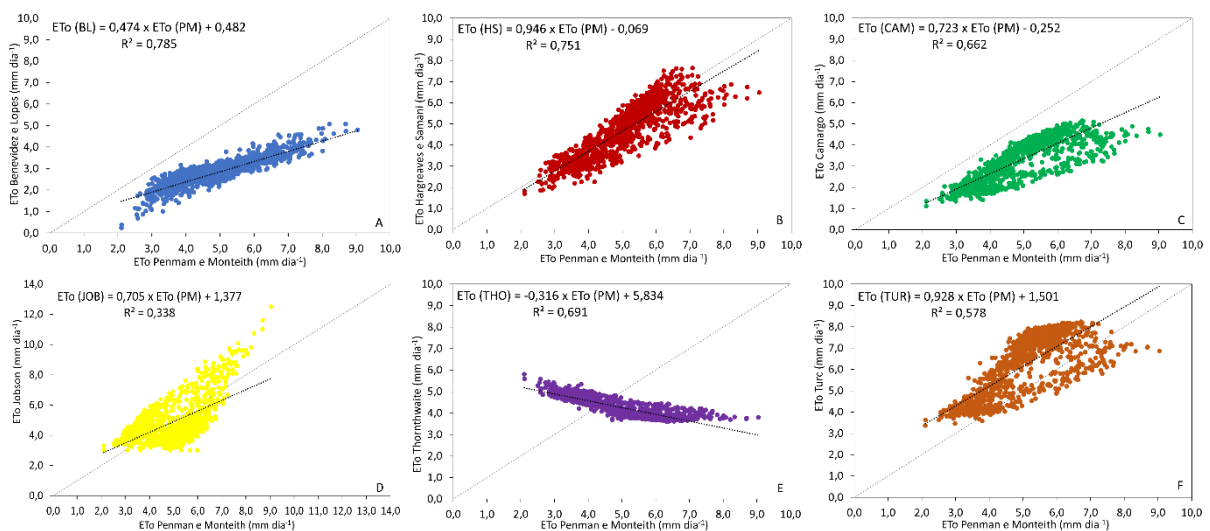
De fato, busca-se modelos precisos que contêm menores variáveis climáticas e de fácil aplicação no cálculo da ETo, sendo assim para cidade de Frutal-MG o modelo de Hargreaves e Samani, é recomendado em função da necessidade apenas dos valores de temperatura e radiação solar. Em trabalho realizado por Turco (2019), o qual considerou a análise de regressão e a metodologia que verifica a influência do desvio-padrão diário da ETo, também observou que o modelo de Hargreaves e Samani apresentou um bom ajuste para estimativa

da ETo em região de cerrado, com condições semelhantes ao do presente trabalho.

É relatado que para o modelo de Hargreaves e Samani, por utilizar poucas variáveis climáticas, seja comum a ocorrência de superestimativa dos valores calculados de ETo em climas úmidos e a subestimar para condições de alta velocidade do vento (CARVALHO et al., 2018). Entretanto, para Uberaba-MG o modelo de Hargreaves e Samani destacou-se em relação aos demais, onde os resultados de coeficiente de determinação, coeficiente de correlação e raiz quadrada do erro médio foram satisfatórios, apresentando valores de erro absoluto médio próximo a $0,50 \text{ mm dia}^{-1}$, ou seja, aceitável em grande parte das atividades que utilizam a ETo (Tabela 3).

Relações realizadas ao longo dos valores diários da evapotranspiração de referência dos métodos ETo estudados comparados com o modelo padrão de Penman e Monteith para Uberaba-MG são apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Relações entre os valores diários da evapotranspiração de referência calculada pela equação de Penman e Monteith e: (A) Benevidéz e Lopes, (B) Hagreaves e Samani, (C) Camargo, (D) Jobson, (E) Thornthwaite e (F) Turc para Uberaba-MG, Brasil.



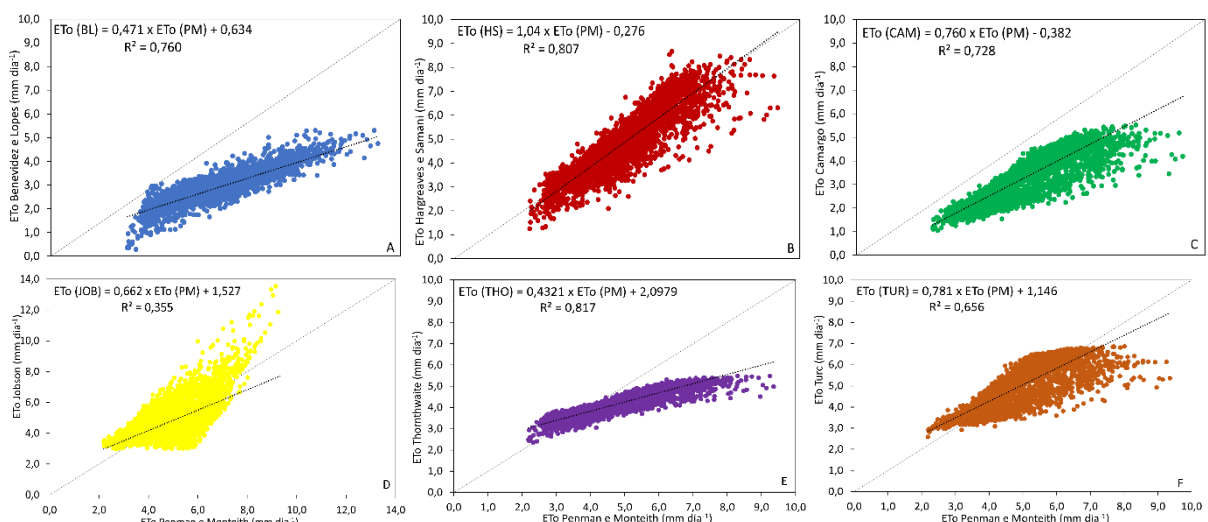
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A evapotranspiração de referência pelo método de Turc foi a que mais superestimou, e os modelos de Camargo e Benevidéz e Lopes foram os que subestimaram a ETo, para Uberaba-MG (Figura 3). Costa et al. (2017) estudando métodos de estimativa de ETo para o estado de Alagoas observaram que o método da Radiação-FAO superestima a ETo e o método de Makkink subestima em relação ao método padrão. Os autores destacam ainda, que as

sobrestimativas e as subestimativas são mais pronunciadas nos meses de maior demanda. Assim como os modelos de Hargreaves e Samani e de Thornthwaite, o modelo de Camargo não é de aplicação universal e, portanto, deve ser calibrado para outras condições climáticas (PALARETTI et al., 2014).

Comparações dos métodos estudados ao decorrer dos valores diários da evapotranspiração de referência, comparando cada método com o modelo padrão de Penman e Monteith para Conceição das Alagoas-MG, Brasil, do presente estudo é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Relações entre os valores diários da evapotranspiração de referência calculada pela equação de Penman e Monteith e: (A) Benevides e Lopes, (B) Hargreaves e Samani, (C) Camargo, (D) Jobson, (E) Thornthwaite e (F) Turc para Conceição das Alagoas-MG, Brasil.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

O modelo de Hargreaves e Samani sobressaiu-se de forma positiva em relação aos demais para Conceição das Alagoas-MG, sendo evidenciado ao apresentar valores de coeficiente de determinação igual a 80,7%, raiz quadrada do erro médio de 1,06 mm dia⁻¹ e erro absoluto médio de 0,48 mm dia⁻¹ (Tabela 3). Silva et al. (2012) verificaram que a utilização do método de Hargreaves e Samani apresentou resultados satisfatórios na escala de 1, 3 e 10 dias para a região norte da cidade de Recife-PE, e para a escala diária obtiveram valores de r, d e C igual a 0,83, 0,99, 0,83, classificando o método como “muito bom”.

O método de Hargreaves e Samani foi desenvolvido para as condições de clima semi-árido da Califórnia e é recomendado pela FAO (Allen et al., 1998) como uma opção para a

estimativa da ETo quando há somente disponibilidade de dados de temperatura do ar local. Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira et al. (2015), que estudando modelos de ETo, observaram que o modelo de Hargreaves e Samani destacou-se positivamente com a correção da regressão linear, a equação pode ser utilizada para a estimativa de evapotranspiração se aproximando do modelo padrão de Penman e Monteith, para a região de Rio Paranaíba-MG.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A evapotranspiração de referência (ETo) anual média para a região do Triângulo Mineiro Sul é igual a 1.827,6 mm e a média diária é de 5,0 mm dia⁻¹. A variação da ETo mensal apresenta tendência de maiores valores acumulados nos meses de verão e redução nos meses de inverno, ou seja, acompanha a incidência da radiação solar e temperatura na região.

O modelo de Hargreaves e Samani obteve melhor desempenho quando comparado aos demais modelos, apresentando maior acurácia, com erro absoluto inferior a 0,50 mm dia⁻¹ e precisão, com coeficiente de correlação superior a 0,85 e de determinação maior que 75%.

Conclui-se que o modelo de Hargreaves e Samani é o que mais se aproxima ao modelo padrão de Penman e Monteith, sendo recomendado para a região do Triângulo Mineiro Sul quando há escassez de dados climáticos.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa ao primeiro autor e ao Programa de Bolsas de Produtividade em Pesquisa (PQ/UEMG) pela concessão de bolsas ao segundo e terceiro autor.

REFERÊNCIAS

AHMADI, Seyed Hamid; FOOLADMAND, Hamid Reza. Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: a case study, South of Iran. *Irrigation Science*, Berlin, v. 26, p. 303-312, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0094-8>

ALLEN, Richard G.; PEREIRA, Luis S.; RAES, Dirk; SMITH, Martin. Crop **Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**, Rome: FAO, 1998, 301p. Irrigation and Drainage Paper 56.

BOWIE, George L. et al. **Rates, constants and kinetics formulations in surface water quality modeling**. 2nd ed. Athens: U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Lab., 1985.

CAPORUSSO, Natália Buzinaro; ROLIM, Glauco de Souza. Reference evapotranspiration models using different time scales in the Jaboticabal region of São Paulo, Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 37, p. 1-9, 2015. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v37i1.18277>

CARVALHO, Thayslan Renato Anchieta; BRASIL, José Bandeira; LIMA JUNIOR, Juarez Cassiano; MACÊDO, Kleber Gomes. Evapotranspiração de referência para Campos Sales–CE métodos combinados e empíricos. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 9, p. 123-136, 2018. <https://doi.org/10.21170/geonorte.2018.V.9.N.32.123.136>

COSTA, Juliana Alcântara; RODRIGUES, Gláuber Pontes; SILVA, Neilon Duarte; LOPES SOBRINHO, Oswaldo Palma; COSTA, Laisa Daiana Alcântara. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Alagoas. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 25, p. 173-179, 2017. <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v25i1.26277>

FARIA, Rogério Teixeira; CARAMORI, Paulo Henrique; CHIBANA, Eduardo Yasuji; BRITO, Letícia Regina Souza Clima - Programa computacional para organização e análise de dados meteorológicos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, p. 372-387, 2003.

GOULART, Milena A.; SANCHES, Luciana; VILANI, Maricéia T.; PINTO JÚNIOR, Osvaldo B. Análise da evapotranspiração por wavelet de Morlet em área de *Vochysia divergens* Pohl no Pantanal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, p. 93-98, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p93-98>

HOPKINS, William G. Correlation coefficient. 2000. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso em: Março 2, 2022.

JOBSON, Harvey E. **Thermal modeling of flow in the San Diego Aqueduct, California, and its relation to evaporation**. San Diego: US Geological Survey, 1980.

LIMA, João Guilherme Araújo; VIANA, Paula Carneiro; SOBRINHO, José Espínola; COUTO, João Paulo Chaves. Comparação de métodos de estimativa de ETo e análise de sensibilidade para diferentes climas brasileiros. **Irriga**, Botucatu, v. 24, p. 538-551, 2019. <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n3p538-551>

MATZENAUER, Ronaldo; BERLATO, Moacir Antônio; DOS REIS SAMPAIO, Márcia; TRINDADE, Júlio Kuhn. Efeitos do fenômeno Enos sobre a evapotranspiração de referência na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 67-70, 2008.

MEDEIROS, Sandro Luis Petter. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região mesoclimática de Santa Maria-RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 6, p. 105-109, 1998.

OLIVEIRA, Gabriel Queiroz; LOPES, Adriano da Silva; JUNG, Leandro Henrique; NAGEL, Pedro Luiz; BERTIOLI, Dreyfus Martins. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência baseadas na temperatura do ar, em Aquidauana-MS. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 5, n. 3, p. 224-234, 2011.

OLIVEIRA, Luiz Fernando Coutinho; CARVALHO, Daniel Fonseca de; ROMÃO, Patrícia de Araújo; CORTÊS, Fernando Cardoso. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para algumas localidades no estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 31, n. 2, p. 122–126, 2001.

OLIVEIRA, Vinícius Mendes Rodrigues; DE FIGUEREDO DANTAS, Geffson; PALARETTI, Luíz Fabiano; DALRI, Alexandre Barcellos; DOS SANTOS, Miquéias Gomes; FISCHER FILHO, João Alberto. Estimativa de evapotranspiração de referência na região de Rio Paranaíba-MG. **Irriga**, Botucatu, v. 20, p. 790-798, 2015. <https://doi.org/10.15809/irriga.2015v20n4p790>

PALARETTI, Luíz Fabiano; MANTOVANI, E Everardo C.; SEDIYAMA, Gilberto C. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em regiões citrícolas paulistas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, p. 38-47, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000100005>

PEREIRA, Antônio Roberto; ANGELOCCI, Luiz Roberto; SENTELHAS, Paulo César. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002.

PINHEIRO, Marcus André Braido; OLIVEIRA, Aline Lílian Marques; BORGES, João Carlos Ferreira; OLIVEIRA, Evandro Chaves; CARVALHO, Luiz Gonzaga. Reference evapotranspiration based on temperature in Minas Gerais state, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 43, e004219, 2019. <https://doi.org/10.1590/1413-7054201943004219>

SILVA, Alexsandro Oliveira; SILVA, Ênio Farias de França; ALBUQUERQUE MOURA, Ênio Farias de França; OLIVEIRA LOPES, Pabricio Marcos Avaliação do desempenho de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial para a região Norte de Recife-PE. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 20, p. 163-174, 2012. <https://doi.org/10.13083/reveng.v20i2.291>

SYPERRECK, Vera Lucia Greco.; KLOSOWSKI, Elcio Silvério; GRECO, Marcelo; FURLANETTO, Cleber. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 30, p. 603-609, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1807-86212008000500001>

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3 ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH, 2004. 943p.

TURCO, José Eduardo Piteli. Estimativa da evapotranspiração de referência com precisão. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 27, p. 132-141, 2019. <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i2.876>

VEGA, Emil C.; JARA, Jorge C. Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (Costa y Región Andina) del Ecuador. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, p. 390-403, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000300006>

XIANG, Keyu, LI, Yi, HORTON, Robert, FENG, Hao. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 232, p. 1–16, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106043>