



Revista Brasileira de Agricultura Irrigada v.14, n°.4, p. 4141 – 4153, 2020  
ISSN 1982-7679 (On-line)  
Fortaleza, CE, INOVAGRI – <http://www.inovagri.org.br>  
DOI: 10.7127/rbai.v14n401185  
Protocolo 1185.20 – 30/08/2020      Aprovado em 25/11/2020

## **ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DOS COEFICIENTES DE CULTIVO DA CULTURA DA BETERRABA**

Márcio José de Santana<sup>1</sup>, Heuler Hordones Chaves<sup>2</sup>, Maria Elisângela Ferreira de Oliveira<sup>3</sup>, André Luís Teixeira Fernandes<sup>4</sup>, Mariana Alves Calzado<sup>5</sup>, Matheus Neves Ferreira<sup>5</sup>

### **RESUMO**

A cultura da beterraba é bastante susceptível às deficiências hídricas e sua produtividade e a qualidade das raízes são intensamente influenciadas pelas condições de umidade no solo. Para melhores rendimentos, é fundamental o controle da umidade do solo durante todo o ciclo da cultura, com controle das irrigações conforme as exigências hídricas. Este trabalho objetivou determinar a evapotranspiração de referência por diferentes modelos de estimativa e os respectivos coeficientes de cultivo da cultura da beterraba. Foram avaliados oito modelos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>): Tanque Classe A, Thornthwaite, Thornthwaite-Camargo, Camargo, Hargreaves e Samani, Priestley-Taylor e Blaney-Cridle comparando-os ao modelo de Penman-Monteith. Os resultados mostraram que somente dois modelos aproximaram-se dos valores obtidos pelo modelo de Penman-Monteith, que apresentou evapotranspiração de referência média de 1,91 mm dia<sup>-1</sup> e valor acumulado para o ciclo da beterraba de 156,61 mm, com coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) médio de 1,30. Assim, o método de Priestley-Taylor foi o mais indicado, porém o método de Hargreaves e Samani também apresentou um bom desempenho baseado na classificação de valores dos coeficientes de desempenho conforme Camargo e Sentelhas (1997).

**Palavras-chave:** ET<sub>o</sub>, Manejo da irrigação, ET<sub>c</sub>.

## **ESTIMATED OF EVAPOTRANSPIRATION AND COEFFICIENTS OF BEET CULTIVATION**

### **ABSTRACT**

The beet culture is very susceptible to water deficiencies and its productivity and the quality of the roots are strongly influenced by the humidity conditions in the soil. For better yields, it is essential to

<sup>1</sup> Prof. Dr. Irrigação e Drenagem, IFTM/*Campus* Uberaba, MG, [marciosantana@iftm.edu.br](mailto:marciosantana@iftm.edu.br)

<sup>2</sup> Eng. Ambiental, Mestre em Produção Vegetal IFTM/*Campus* Uberaba, MG, [heulerchaves@hotmail.com](mailto:heulerchaves@hotmail.com)

<sup>3</sup> Eng. Agrônoma, Mestre em Produção Vegetal IFTM/*Campus* Uberaba, MG, [mariaelisangela94@hotmail.com](mailto:mariaelisangela94@hotmail.com)

<sup>4</sup> Prof. Dr. Engenharia Agrícola, UNIUBE, Uberaba, MG, [andre.fernandes@uniube.br](mailto:andre.fernandes@uniube.br)

<sup>5</sup> Estudante de Eng. Agrônoma IFTM/*Campus* Uberaba, MG, bolsista PET MEC, [marianaalvescalzado@gmail.com](mailto:marianaalvescalzado@gmail.com), [matheusneves148@gmail.com](mailto:matheusneves148@gmail.com)

control soil moisture throughout the crop cycle, with control of irrigations according to water requirements. This work aimed to determine the reference evapotranspiration by different estimation models and the respective cultivation coefficients of the beet culture. Eight reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) estimation models were evaluated: Tanque Classe A, Thornthwaite, Thornthwaite-Camargo, Camargo, Hargreaves and Samani, Priestley-Taylor and Blaney-Cridle comparing them to the Penman-Monteith model. The results showed that only two models approached the values obtained by the Penman-Monteith model, which presented an average reference evapotranspiration of 1.91 mm day<sup>-1</sup> and an accumulated value for the beet cycle of 156.61 mm, with a coefficient average cultivation (K<sub>c</sub>) of 1.30. Thus, the Priestley-Taylor method was the most suitable, however the Hargreaves and Samani method also showed a good performance based on the classification of values of the performance coefficients according to Camargo and Sentelhas (1997).

**Keywords:** ET<sub>o</sub>, irrigation management, ET<sub>c</sub>.

## INTRODUÇÃO

Assim como outras culturas, a produção de beterraba pode sofrer reduções caso não haja o manejo correto da irrigação, pois a cultura é bastante limitada a condições de déficit hídrico, sendo a irrigação um dos fatores que mais favorecem o aumento da produtividade assim como melhoria da qualidade (OLIVEIRA NETO et al., 2011).

A irrigação é a forma mais eficiente de fornecimento de água minimizando os prejuízos ocasionados pela sazonalidade, já que a agricultura tem elevada demanda hídrica para o pleno desenvolvimento (DORIA, 2015). Contudo, esse fornecimento deve ser controlado, devendo para isso haver o conhecimento de informações de evapotranspiração para permite o uso eficiente da água, evitando desperdícios e permitindo o máximo aproveitamento da mesma pelas plantas. Além dessas informações, faz-se necessário o conhecimento da cultura, verificada pela evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>).

A água aplicada via irrigação se torna indispensável para a obtenção de resultados satisfatórios em termos produtivos. Com isso o ideal é aliar a produção com a eficiência do uso da água, surgindo a necessidade do aprimoramento dos fatores de evapotranspiração, solo e clima, principalmente a cultura em estudo (COUTO, 2015). Para isso, deve-se lançar mão dos métodos para quantificação de

evapotranspiração que podem ser diretos ou indiretos. Os métodos diretos são dimensionados por lisímetros, que demandam altos custos em equipamentos e os métodos indiretos que são baseados em equações parametrizadas que utilizam dados meteorológicos, os quais nem sempre estão disponíveis nas propriedades ou região de interesse (SOUZA et al., 2015). Os métodos indiretos, são conhecidos também como métodos físico-matemáticos, e existem vários modelos; no entanto, há aqueles que têm uma boa base física e teórica, mas requerem diversos parâmetros os quais não estão sempre disponíveis. Por outro lado, também existem modelos que exigem apenas temperatura do ar e eventualmente latitude do local (ALENCAR, 2015). Schwenck et al. (2020) mencionam que a lisimetria é utilizada com o objetivo de se conhecer alguns termos do balanço hídrico do volume amostrado através de um reservatório impermeável contendo um volume de solo

Na prática da irrigação, um dos parâmetros que deve ser observado com critério é a evapotranspiração, a qual é a quantidade de água perdida pelas plantas por transpiração adicionada à água perdida pelo solo por evaporação. Pode ser medida ou estimada, e por representar a perda de água de um sistema é uma informação vital para sistemas de irrigação no planejamento hídrico/hidrológico de bacias hidrográficas. A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) é a quantidade de água perdida em um sistema de referência: solo plenamente vegetado (grama)

## ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DOS COEFICIENTES DE CULTIVO DA CULTURA DA BETERRABA

em crescimento ativo e sem restrições hídricas. Seu valor tem por finalidade ser extrapolado para todas as outras culturas (PEREIRA et al., 2016).

A utilização dos métodos simples de ETo são menos custosos devido a menor quantidade de sensores e equipamentos para sua estimativa, os quais necessitam-se de variáveis meteorológicas mais casuais, como temperaturas e umidade relativa, tem despertado interesse de pesquisadores e extensionistas. Porém esses métodos nem sempre resultam boas estimativas, os quais podem superestimar ou subestimar ao compará-los com o método padrão de referência FAO- Penman-Monteith (DANTAS et al., 2016).

A estimativa do coeficiente de cultivo (Kc) padrão para uma dada região é levantando em consideração dados da evapotranspiração de referência calculados pelo método de Penman-Monteith (OLIVEIRA NETO, 2011). Este coeficiente permite a estimativa das necessidades hídricas de uma cultura o que possibilita o melhor manejo da irrigação, visto está relacionado as condições de clima e características de solo local. Para beterraba de mesa, Allen et al. (1998) encontraram valores de Kc de 0,50; 1,05 e 0,95 para as fases inicial, média e final respectivamente, analisadas no clima mediterrâneo. Já Oliveira Neto et al. (2011) encontraram valores superiores, 1,02; 1,18 e 0,84 para as fases inicial, média e final para a região do Rio de Janeiro. Para obter boas estimativas de evapotranspiração com os

métodos mais simples geralmente necessita-se de ajustes locais, para que sua estimativa seja a mais próxima possível do método da FAO-Penman-Monteith. Quando esses métodos simples são ajustados, suas estimativas aumentam a capacidade de decisão do irrigante (DANTAS et al., 2016).

Este trabalho teve como objetivo determinar a evapotranspiração de referência por diferentes modelos de estimativa e os coeficientes de cultivo da cultura da beterraba.

### MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada na área do campo experimental pertencente ao setor de Culturas do Instituto Federal do Triângulo Mineiro de Educação, Ciências e Tecnologia (IFTM) - *Campus* Uberaba, MG. O IFTM – *Campus* Uberaba se localiza a 800m de altitude, com latitude de 19° 39' 19"S e longitude de 47° 57' 27"W. O clima do local, segundo Köppen é do tipo Aw tropical quente e úmido, com inverno frio e seco (Aw), com precipitação e temperatura média anual de 1600 mm e 22,6°C.

Para caracterização da área de pesquisa, foi realizada uma análise química do solo (camada de 0-20 cm) pelo Laboratório de Análise de Solo da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) situado no município de Uberaba, MG, sendo o resultado apresentado na Tabela 1. A coleta do solo foi realizada por meio de trado de comando elétrico.

**Tabela 1.** Resultados das análises físico-química do solo (0-20 cm profundidade) da área experimental. Uberaba, MG, 2019.

Análise química do solo										
pH	Al	Ca	Mg	H+Al	SB	K mg dm <sup>-3</sup>	P mg dm <sup>-3</sup>	V (%)	M (%)	MO (dag kg <sup>-1</sup> )
cmolc dm <sup>-3</sup>										
26,7	0,0	1,7	0,5	1,6	2,4	75	25,2	59,9	0,0	1,2
Análise Física do solo										
Camada (cm)		Areia		Silte		Argila		Classe textural		
0-20		64		10		26		Franco Argilo Arenosa		

SB= soma de bases trocáveis; t= CTC Efetiva; T= CTC potencial a pH 7,0; P-rem= fósforo remanescente; V = percentagem de saturação por bases da CTC a pH 7,0; m = percentagem de saturação por alumínio; MO = matéria orgânica.

Na Tabela 2 constam as equações de ajuste das curvas características de retenção de água no solo para as camadas de 0-20 cm e 20-40 cm de profundidade, segundo o modelo de Van Genuchten (1980).

A partir do solo coletado por meio do cilindro de Uhland, verificou-se valores de

densidade do solo de 1,18 e 1,22 g cm<sup>-1</sup>, para as respectivas profundidades 0-20 e 20-40 cm.

A capacidade de campo foi de 0,23 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para a tensão de água no solo média de 10 kPa na camada de 0-20 cm e ponto de murcha permanente de 0,054 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>.

**Tabela 2.** Resultados da caracterização hídrica do solo da área experimental. Uberaba, MG, 2019.

Camada (cm)	Equação (Van Genuchten)	R <sup>2</sup>
0 – 20	$\theta = \frac{0,46}{\left[1 + (1,4 * \psi_m)^{4,707}\right]^{0,116}} + 0,078$	0,925
20 – 40	$\theta = \frac{0,375}{\left[1 + (0,985 * \psi_m)^{6,917}\right]^{0,127}} + 0,238$	0,958

$\theta$ =umidade volumétrica (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>);  $\psi_m$ =potencial matricial (kPa).

A cultivar utilizada foi a Tall Top Early Wonder, sendo o transplante das mudas na área do experimento realizado no dia 12 de abril de 2019. As mesmas foram produzidas pelo viveiro de mudas Valoriza em Patos de Minas, MG.

A coleta dos dados para balanço hídrico do solo foi realizada em 32 parcelas com a cultura da beterraba. Cada parcela experimental foi composta por dois canteiros, com 3,0 m de comprimento, 1,1 m de largura e 0,40 m entre canteiros. Cada canteiro recebeu linhas duplas de plantio, com espaçamento de 0,30 m entre linhas e 0,10 m entre mudas.

Para aplicação das lâminas de água foi adotado um sistema de irrigação por microaspersão, com uma vazão de 87 litros por hora (L h<sup>-1</sup>), em cada microaspersor, com uma pressão de serviço de 20 mca. Cada parcela continha quatro microaspersores, com espaçamento de 1,20 m em cada canteiro, com sobreposição simulando uma irrigação por aspersão.

A ETc foi obtida promovendo-se o balanço hídrico (Equação 1) para um perfil de controle correspondente a 25 cm.

$$\Delta A = P + I \pm Q - ETc - E \quad (1)$$

Em que:  $\Delta A$  - variação do armazenamento;

P - lâmina precipitada (mm); I - irrigação (mm) – lâminas aplicadas diariamente; Q - lâmina que entra ou sai do contorno inferior (mm); ETc - evapotranspiração (mm) e E - deflúvio superficial (mm).

Os dados de precipitação foram obtidos por meio de uma estação meteorológica automática do Núcleo de Estudos em Manejo de Culturas Irrigadas (NUMAI) localizada no IFTM Campus Uberaba-MG.

Para a estimativa do deflúvio superficial (E), foram confrontadas lâminas precipitadas com lâminas infiltradas, levantadas por meio do método de infiltrômetro de anel.

O movimento de água no contorno inferior (Q) foi determinado pela equação de Darcy-Buckingham (Equação 2).

$$q = -K(\theta) \cdot \left(\frac{d\psi}{dx}\right) \quad (2)$$

Em que: q- densidade de fluxo da água no solo (mm h<sup>-1</sup>); K( $\theta$ ) - condutividade hidráulica do solo (mm h<sup>-1</sup>) e  $\frac{d\psi}{dx}$  - gradiente de potencial total (mm mm<sup>-1</sup>).

## ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DOS COEFICIENTES DE CULTIVO DA CULTURA DA BETERRABA

A condutividade hidráulica do solo não saturado foi determinada pelo método de (Mualem 1976) (Equação 3).

$$K(\theta) = K_0 w^L \left( 1. \left( 1. w^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2 \quad (3)$$

Em que:  $K_0$ - condutividade hidráulica do solo saturado, obtido pelo Permeômetro de Guelph;  $w$ - saturação relativa e  $L$  - parâmetro empírico, que foi estimado por Mualem (1976) como sendo, aproximadamente 0,5, para a maioria dos solos (LIBARDI, 1996).

Diariamente eram coletadas amostras de solo para determinação da variação no armazenamento de água, a qual foi encontrada pela diferença de umidade média obtida por meio da estufa padrão (método gravimétrico).

A variação do armazenamento foi calculada com base na Equação 4.

$$\Delta A = (\theta_f - \theta_i). z \quad (4)$$

Em que:  $\Delta A$  - variação de armazenamento no intervalo de tempo considerado (mm);  $\theta_f$ - umidade média no tempo final ( $m^3 m^{-3}$ );  $\theta_i$ - umidade média no tempo inicial ( $m^3 m^{-3}$ ) e  $z$  - profundidade considerada para o balanço (25 cm).

Os métodos utilizados para a obtenção do  $ETo$  (Tabela 3) foram: Penman-Monteith (PM), Tanque Classe A (TCA), Thornthwaite (Th), Thornthwaite-Camargo (ThC), Camargo (Cm), Hargreaves e Samani (HgS), Priestley-Taylor (PT) e Blaney-Cridle (BC).

**Tabela 3.** Equações dos métodos utilizados para estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Uberaba, MG.

Método	Equação
Penman-Monteith (PM)	$ETo = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \left( \frac{900}{T+273} \right) \cdot U_2(es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)}$
Tanque Classe A (TCA)	$ETo_{TCA} = EV \cdot KP$
Thornthwaite (Th)	$ETo_{Th} = \left( \frac{ETp}{30} \right) \cdot \left( \frac{N}{12} \right)$
Thornthwaite-Camargo (ThC)	$ETo_{ThC} = 16. \left( 10 \left( \frac{T_{ef}}{I} \right)^a \cdot \frac{N}{12} \cdot \frac{1}{30} \right)$
Camargo (Cm)	$ETo = 0,01 \times Ra \times T_{méd} \times K$
Hargreaves e Samani (HgS)	$ETo_{HgS} = 0,0023 \cdot Ra \cdot (T_{máx} - T_{mín})^{0,5} \cdot (T_m + 17,8)$
Priestley-Taylor (PT)	$ETo_{PT} = \frac{\alpha \cdot W \cdot (Rn - G)}{\lambda}$
Blaney-Cridle (BD)	$ETo_{BC} = a + b [f(0,46T_{méd} + 8,13)]$

Em que:  $ETo$  - evapotranspiração de referência por Penman-Monteith ( $mm \text{ dia}^{-1}$ );  $\Delta$  - declividade da curva de pressão de vapor na saturação ( $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ );  $Rn$  - saldo de radiação ( $MJ \text{ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ );  $G$  - fluxo de calor no solo ( $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ );  $U_2$  - velocidade do vento a 2 metros de altura ( $m \text{ segundos}^{-1}$ );  $T$  - temperatura média ( $^\circ C$ );  $es$  - pressão de vapor na saturação ( $kPa$ );  $ea$  - pressão de vapor atual ( $kPa$ );  $t$  - temperatura do bulbo seco ( $^\circ C$ );  $EV$  - evaporação do tanque lida no parafuso micrométrico (mm);  $KP$  - coeficiente do tanque tabelado e em função de umidade relativa, velocidade do vento, posição do

tanque e local instalado;  $ETp$  - evapotranspiração padronizada para um mês de 30 dias;  $N$  - fotoperíodo (hora);  $T_{ef}$  é a temperatura efetiva calculada;  $Ra$  - Radiação no topo da atmosfera ( $MJ \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $T_{méd}$  - temperatura média ( $^\circ C$ );  $K$  - o fator de ajuste de Camargo; 1,00 para temperatura média do ar ( $T_{méd}$ ) até  $23,5^\circ C$ ; 1,05 para  $T_{méd}$  de  $23,6$  a  $24,5^\circ C$ ; 1,1 para  $T_{méd}$  de  $24,6$  a  $25,5^\circ C$ ; 1,15 para  $T_{méd}$  de  $25,6$  a  $26,5^\circ C$ ; 1,20 para  $T_{méd}$  de  $26,6$  a  $27,5^\circ C$  e 1,30 para  $T_{méd}$  superior a  $27,5^\circ C$ ;  $Ra$  é a radiação solar ( $MJm^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) no topo da atmosfera;  $\lambda$  - calor latente de evaporação ( $2,45 \text{ MJkg}^{-1}$ );  $W$  -

valor de ponderação =  $\frac{\Delta}{\Delta+Y}$ , sendo  $\Delta$  a declividade da curva de pressão de vapor e  $Y$  o coeficiente psicrométrico;  $a$  e  $b$  - fatores de ajuste em funções das variáveis climáticas (adimensionais), conforme Doorenbos e Pruitt (1977) e  $f$  - porcentagem mensal das horas de luz solar.

Para o cálculo do coeficiente da cultura utilizou-se a equação proposta por Doorenbos e Kassam (1979).

$$Kc_i = \left( \frac{ETc}{ETo_i} \right) \quad (5)$$

Em que:  $Kc_i$  - coeficiente da cultura para o respectivo  $ETo$  avaliado;  $ETc$  - evapotranspiração da cultura obtido pelo balanço hídrico ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) e  $ETo_i$  - evapotranspiração de referência do respectivo modelo avaliado ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

Com o objetivo de analisar o desempenho dos modelos testados em comparação com o modelo padrão (Penman-Monteith), foi realizado o teste estatístico de Willmont (1982), utilizando o índice de

concordância ( $d$ ) (Equação 6), sendo aplicado também o coeficiente de Pearson ( $r$ ) (Equação 7) e o índice de desempenho ( $c$ ), introduzido por Camargo e Sentelhas (1997) (Tabela 4) que engloba os coeficientes “ $d$ ” e “ $r$ ” (Equação 8).

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (Pi - Oi)^2}{\sum (|Pi - O| + |Oi - O|)^2} \right] \quad (6)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Oi - O) \cdot (Pi - P)}{\left( \sqrt{\sum_{i=1}^N (Oi - O)^2} \right) \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (Pi - P)^2}} \quad (7)$$

$$c = r \cdot d \quad (8)$$

Em que:  $P_i$  - valores de  $ETo$  obtidas com o modelo avaliado ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $P$  - valor da média de  $ETo$  do modelo avaliado ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $O_i$  - valores de  $ETA$  obtidas com o modelo de Penman-Monteith ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) e  $O$  - valor da média de  $ETo$  do modelo de Penman-Monteith ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

**Tabela 4.** Valores dos coeficientes de desempenho ( $c$ ) conforme Camargo e Sentelhas (1997).

Coeficiente de desempenho	Desempenho
>0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito Bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
$\leq 0,30$	Péssimo

O índice de concordância “ $d$ ”, varia de 0 a 1, sendo 0 correspondente a não haver concordância entre os valores analisados e 1 corresponde a concordância perfeita entre os valores analisados.

Também foi gerado para quantificação dos erros, o erro médio absoluto (EMA), o erro máximo ( $Emáx$ ), o erro aleatório ( $Ea$ ) e o erro sistemático ( $Es$ ) apresentados nas Equações de 9 a 12.

$$EMA = \left( \frac{1}{N} \right) \cdot \sum_i^n (Oi - Pi) \quad (9)$$

$$EM = \max (|Oi - Pi|)_1^n \quad (10)$$

$$Ea = \left( \frac{1}{N} \right) \cdot \sum_i^n (Pi - P^*)^2 \quad (11)$$

$$Es = \left( \frac{1}{N} \right) \cdot \sum_i^n (P^* - Oi)^2 \quad (12)$$

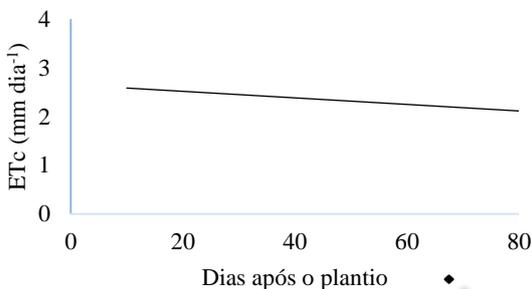
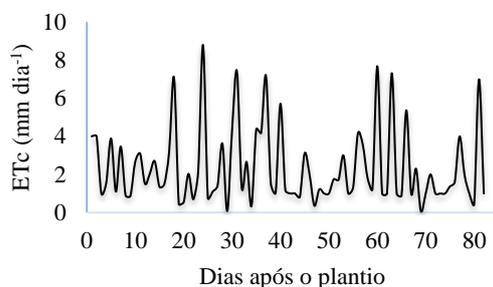
Em que:  $N$  - número de estimativas;  $E$  para o cálculo dos  $Ea$  e  $Es$ , o valor de  $P^*$  (Eq. 13) corresponde:

$$P^* = a + bOi \quad (13)$$

## ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DOS COEFICIENTES DE CULTIVO DA CULTURA DA BETERRABA

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

O valor da  $ET_c$  obtido por meio do balanço hídrico, foi de 190,10 mm acumulados



**Figura 1.** Apresentação da  $ET_c$  obtidas por meio do balanço hídrico: diário (A) e médias decendiais (B).

Na Tabela 5 estão dispostas as médias diárias e os valores acumulados da  $ET_o$  obtidos pelos diferentes modelos de estimativa estudados, sendo o valor de referência obtido por meio do método de PM. Os dois maiores valores de média foram respectivamente encontrados nos modelos de Blaney-Cridle ( $4,17 \text{ mm dia}^{-1}$ ) e Thornthwaite-Camargo ( $4,10 \text{ mm dia}^{-1}$ ) e os dois menores nos modelos de Camargo ( $1,31 \text{ mm dia}^{-1}$ ) e

Hargreaves e Samani ( $1,83 \text{ mm dia}^{-1}$ ), sendo encontrada a mesma tendência para os valores acumulados pelos modelos: Blaney-Cridle (341,97 mm) e Thornthwaite-Camargo (336,39 mm), Camargo (107,48 mm) e Hargreaves e Samani (150,14 mm). Já os valores encontrados por meio do modelo de PM foram médios diários de  $1,91 \text{ mm dia}^{-1}$  e acumulado no ciclo de 156,61 mm.

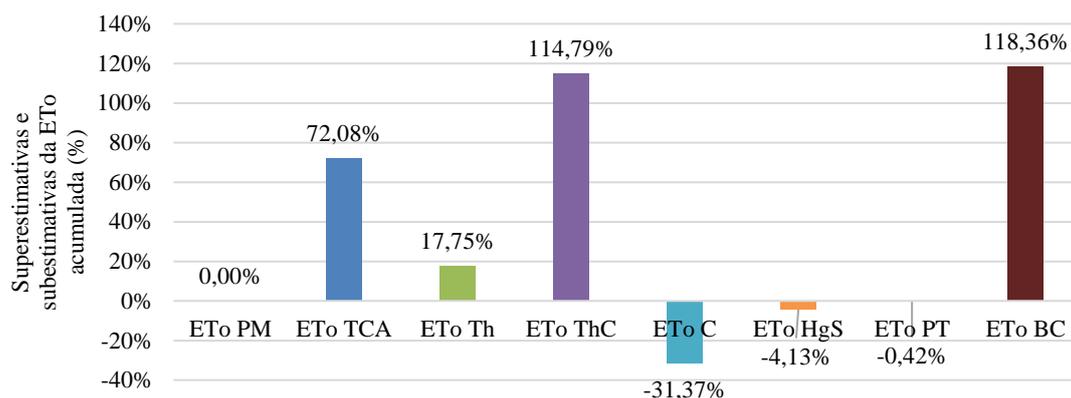
**Tabela 5.** Médias diárias e valores acumulados da evapotranspiração de referência.

	$ET_o$							
	PM	TCA	Th	ThC	Cm	HgS	PT	BC
Média ( $\text{mm dia}^{-1}$ )	1,91	3,29	2,25	4,10	1,31	1,83	1,90	4,17
Total (mm)	156,61	269,49	184,41	336,39	107,48	150,14	155,95	341,97

Foram obtidas as subestimativas e superestimativas (Figura 2), por meio da razão da diferença entre a evapotranspiração acumulada pelas diferentes equações avaliadas em relação ao modelo PM.

Pela Figura 2 é possível observar que o modelo que mais superestimou foi a de Blaney-Cridle apresentando uma diferença de média relativa de 118,36% em relação a Penman-Monteith seguida pelo modelo de Thornthwaite-Camargo com diferença média

relativa de 114,79%. Segundo Kobayashi et al. (2018), em que obtiveram a estimativa de evapotranspiração de referência é adequada as equações de Penman-Monteith e Blaney-Cridle para a cultura do trigo, na região de Uberaba, MG, os valores de  $ET_o$  e de coeficiente da cultura obtidos pelo método de Hargreaves-Samani superestimaram os valores dos métodos de Penman-Monteith e Blaney-Cridle.



**Figura 2.** Superestimativas e subestimativas da ETo acumulada.

Pela Figura 2 é possível observar que o modelo que mais superestimou foi a de Blaney-Cridle apresentando uma diferença de média relativa de 118,36% em relação a Penman-Monteith seguida pelo modelo de Thornthwaite-Camargo com diferença média relativa de 114,79%. Segundo Kobayashi et al. (2018), em que obtiveram a estimativa de evapotranspiração de referência é adequada as equações de Penman-Monteith e Blaney-Cridle para a cultura do trigo, na região de Uberaba, MG, os valores de ETo e de coeficiente da cultura obtidos pelo método de Hargreaves-Samani superestimaram os valores dos métodos de Penman-Monteith e Blaney-Cridle.

Já os modelos com maior subestimativa

da ETo foram a de Camargo, apresentando uma diferença de média relativa de 31,37% em relação a Penman-Monteith seguida pelo modelo de Hargreaves e Samani (4,13%). O modelo de Priestley-Taylor apresentou a menor diferença de ETo entre todos os modelos avaliados. Com média diária para o ciclo de 1,90 mm dia<sup>-1</sup> e um valor acumulado de 155,95 mm com uma diferença subestimado de 0,42% quando se comparado a PM.

Os dois maiores valores médios de Kc foram obtidos por meio dos modelos de Camargo (1,95) e Hargreaves e Samani (1,40) e os dois menores pelos modelos propostos por Blaney-Cridle (0,56) e Thornthwaite-Camargo (0,58).

**Tabela 6.** Valores de Kc da beterraba por estágio de desenvolvimento

Estádios de desenvolvimento	Kc							
	PM	TCA	Th	ThC	C	HgS	PT	BC
Estádio I (0 a 23 DAT*)	0,97	0,66	1,00	0,54	1,39	0,89	0,87	0,49
Estádio II (24 a 50 DAT)	1,65	0,81	1,12	0,64	2,14	1,70	1,64	0,61
Estádio III (51 a 73 DAT)	1,34	0,78	1,00	0,58	2,02	1,56	1,46	0,59
Estádio IV (74 a 82 DAT)	1,04	0,90	1,00	0,52	1,71	1,38	1,31	0,54

\*DAT: dias após o transplantio.

De acordo com Doorenbos e Pruitt (1977) os valores de Kc da beterraba variam de 0,40 a 0,50 para o estágio I, de 0,75 a 0,85 para o estágio II, de 1,05 a 1,20 para o estágio III e de 0,60 a 0,70 para o estágio IV. Os valores apresentados correspondem a condição climática sob alta umidade ( $UR > 70\%$ ) e vento fraco ( $V < 5 \text{ m s}^{-1}$ ) e o segundo número a condição climática sob baixa umidade ( $UR < 50\%$ ) e vento forte ( $V > 5 \text{ m s}^{-1}$ ),

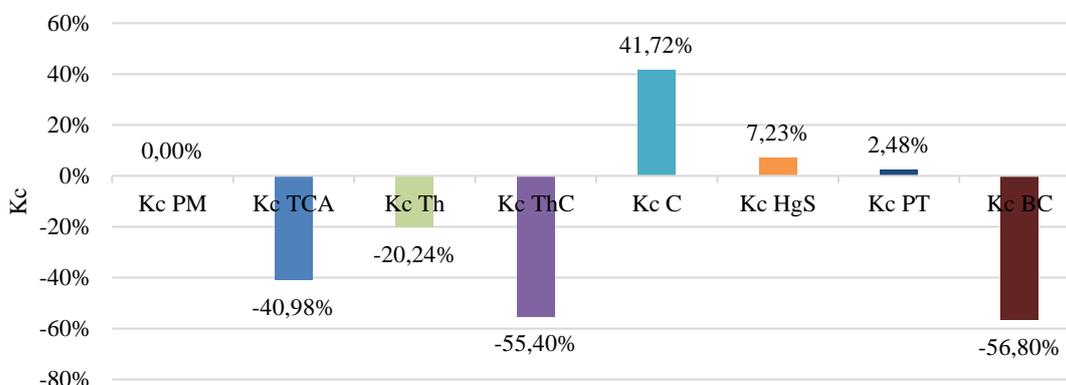
respectivamente. Para Silva et al. (2014) menores valores de Kc para a beterraba foram encontrados em ambiente protegido quando comparados ao ambiente de campo, e outros autores. Lima Júnior et al. (2016) evidenciaram que a calibração dos coeficientes da equação de Hargreaves e Samani para o estado do Ceará se mostrou como uma alternativa para uma melhor estimativa da evapotranspiração de referência em locais com

## ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DOS COEFICIENTES DE CULTIVO DA CULTURA DA BETERRABA

disponibilidade de dados limitada; e que o modelo superestima a equação Penman-Monteith nos primeiros meses do ano. DANTAS et al., (2016) verificaram para as mesorregiões da Paraíba, que a estimativa da evapotranspiração de referência, obtida pelos métodos empíricos, obtiveram desempenho satisfatório pelo coeficiente de desempenho e o método de Hargreaves-Samani para a mesorregião do agreste não necessitou de ajustes. Sales et al. (2018) observaram que alguns modelos foram considerados de boa precisão em seus estudos, sendo Priestley e Taylor, um dos destaques.

Os resultados obtidos no modelo de PM por estágio (I, II e III) foram em média 72% superiores aos valores encontrados por Allen et al. (1998) e 30% superior aos valores encontrados por Oliveira Neto et al. (2011). O Kc obtido por meio TCA gerou os resultados mais próximos de Allen et al. (1998) e Thornthwaite gerou os resultados mais próximos de Oliveira Neto et al. (2011).

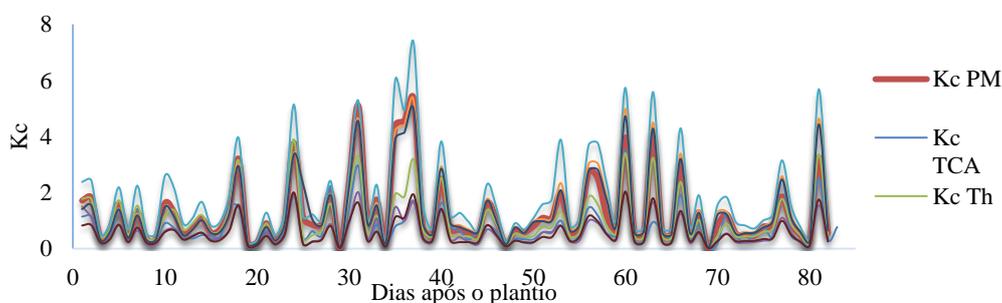
Na Figura 3 constam os valores das subestimativas e superestimativas obtidas por meio da razão da diferença entre Kc dos modelos avaliados em relação ao Kc obtido pelo modelo PM.



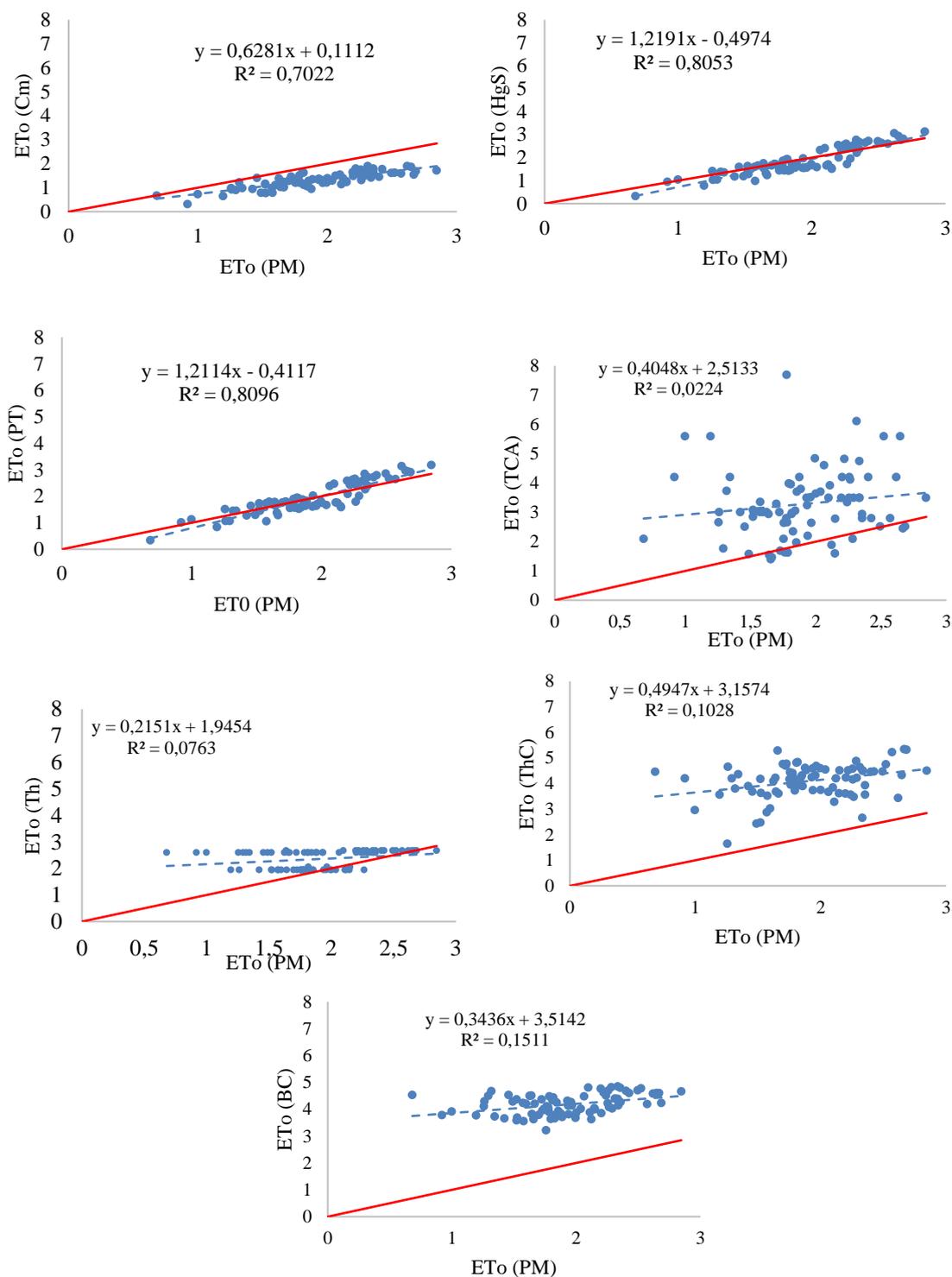
**Figura 3.** Análise das superestimativas e subestimativas de Kc.

Os resultados obtidos foram inversos se comparados as análises de superestimativa e subestimativa da ETo apresentados na Figura 2. Como exemplo, na análise da ETo, o modelo de Blaney-Cridle apresentou a maior superestimativa de 118,36%, já na análise de Kc o modelo apresentou a maior subestimativa

56,80%. Assim, como na análise de ETo, o valor de Kc obtido por meio do modelo de Priestley-Taylor (1,34) foi o mais próximo do Kc obtido por meio do modelo de Penman-Monteith (1,30); porém; a diferença percentual superestimada foi de 2,48%. Os valores diários de Kc estão apresentados na Figura 4.



**Figura 4.** Valores de Kc obtidos pelos respectivos métodos em análise.



**Figura 5.** Equação de regressão entre os valores de ETo média diária estimadas pelos métodos de Camargo (Cm) (A); Hargreaves e Samani (HgS) (B), Priestley-Taylor (PT), Tanque Classe A (TCA), Thornthwaite (Th), Thornthwaite-Camargo (ThC) e Camargo (Cm) e de Blaney Criddle (BC) comparando que o método de Penman-Monteith, Uberaba, MG, 2019.

Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para a evapotranspiração de referência (ETo) dos métodos avaliados para Uberaba-MG, na escala diária, em relação ao modelo padrão

Penman-Monteith apresentaram valores entre 0,002 e 0,810. Entretanto os modelos do Tanque Classe A, Thornthwaite, Thornthwaite-Camargo e Blaney-Cridle

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DOS COEFICIENTES DE CULTIVO DA CULTURA DA BETERRABA**

apresentaram o coeficiente de determinação inferiores a 0,6.

Os coeficientes de determinação para os modelos estudados encontram-se na Figura 5. As equações empíricas que apresentaram melhor ajuste em relação a PM na escala diária, com os respectivos  $R^2$  foram os modelos de Priestley-Taylor ( $R^2=0,810$ ),

Hargreaves e Samani ( $R^2=0,805$ ) seguido de Camargo ( $R^2=0,702$ ).

Verificou-se também além do coeficiente de determinação os coeficientes de correlação (r), de Willmott (d) e o índice de confiança (c) dos métodos analisados para escala diária, dispostos na Tabela 7.

**Tabela 7.** Coeficiente de correlação “r”, “d” de Willmott e desempenho “c” para ETo dos modelos avaliados, na escala diária.

Métodos	Avaliação do desempenho na escala média diária				Desempenho
	%	"d"	"r"	"c"	
Penman-Montheit	100,00%	1,000	1,000	1,000	Ótimo
Priestley-Taylor	99,58%	0,927	0,900	0,834	Muito Bom
Hargreaves e Samani	95,87%	0,919	0,897	0,825	Muito Bom
Camargo	68,63%	0,613	0,838	0,514	Mediano
Blaney-Cridle	218,36%	0,247	0,389	0,096	Péssimo
Thornthwaite-Camargo	214,79%	0,242	0,321	0,078	Péssimo
Tanque Classe A	172,08%	0,270	0,150	0,040	Péssimo
Thornthwaite	117,75%	0,439	0,044	0,019	Péssimo

Dentre os sete modelos de estimativa de ETo analisados, o que obteve melhor desempenho foi o método de Priestley-Taylor ( $c=0,834$ ). Outro método que também apresentou um desempenho muito bom foi o método Hargreaves e Samani ( $c=0,825$ ).

Os métodos Tanque Classe A e Blaney-Cridle obtiveram os maiores erros, conforme observado na Tabela 8.

De maneira análoga, os menores erros foram obtidos por meio do método de Priestley-Taylor.

**Tabela 8.** Erros médio aleatório, máximo, absoluto e sistemático a partir dos valores da Evapotranspiração de referência.

Métodos	Avaliação dos erros para ETo			
	EMA	Emáx	Ea	Es
Penman-Montheit	0,000	0,000	0,000	0,000
Tanque classe A	-1,377	5,924	1,304	1,960
Thornthwaite	-0,339	3,786	0,002	0,299
Thornthwaite-Camargo	-2,192	3,786	0,390	4,853
Camargo	0,599	1,131	0,031	0,384
Hargreaves e Samani	0,079	0,641	0,066	0,015
Priestley-Taylor	0,008	0,570	0,063	0,008
Blaney-Cridle	-2,261	3,846	0,121	5,189

EMA=Erro Médio Aleatório; Emáx=Erro Máximo; Ea=Erro absoluto e Es=Erro sistemático

Avaliando-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para Kc para a cultura da beterraba levantando-se por meio das respectivas evapotranspirações de referência (ETo) dos métodos avaliados (TCA, Th, ThC, Cm, HgS, PT e BC), em relação ao

Kc obtido por meio do modelo padrão Penman-Monteith, os valores entre ficaram entre 0,60 e 0,95. O coeficiente de determinação e os coeficientes de correlação (r), de Willmott (d) e o índice de confiança (c) dos respectivos Kc obtidos por meio dos

métodos de ETo analisados dispostos na Tabela 9.

**Tabela 10.** Coeficiente de correlação “r”, “d” de Willmott e desempenho “c” para Kc dos modelos avaliados, na escala diária

Avaliação do desempenho na escala média diária					
Métodos	%	"d"	"r"	"c"	Desempenho
Penman-Montheit	100,00%	1,000	1,000	1,000	Ótimo
Priestly-Taylor	102,48%	0,987	0,973	0,960	Ótimo
Hargreaves e Samani	107,23%	0,984	0,973	0,957	Ótimo
Camargo	141,72%	0,933	0,975	0,910	Ótimo
Thornthwaite	79,76%	0,921	0,918	0,846	Muito Bom
Tanque Classe A	59,02%	0,746	0,918	0,685	Médiano
Blaney-Cridle	43,20%	0,680	0,936	0,636	Médiano
Thornthwaite-Camargo	44,60%	0,683	0,923	0,630	Médiano

## CONCLUSÕES

O modelo de Penman-Monteith apresentou 1,91 mm dia<sup>-1</sup> de ETo e valor acumulado para a produção da beterraba, cultivar Tall Top Early Wonder, 156,61mm para a região de Uberaba -MG.

Dentre todos os modelos analisados o método de Priestley-Taylor foi o que apresentou as melhores estimativas de ETo e Kc quando se comparado ao modelo padrão de Penman-Monteith. Entretanto o modelo de Hargreaves e Samani também apresentou um bom desempenho. Priestley-Taylor e Hargreaves e Samani apesar de apresentarem boas estimativas, subestimaram os valores de ETo encontrados Penman-Monteith.

Os modelos de Blaney-Cridle, Thornthwaite-Camargo, Tanque Classe A e Thornthwaite apresentaram desempenho péssimo na análise de ETo.

## REFERÊNCIAS

ALENCAR, L. P. DE; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Revista de Eng. Agrícola**. v.35, n. 1, p. 39-50, 2015.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines of computing crop water

requirements. Roma: FAO, 1998. 300 p (FAO. **Irrigation and Drainage Paper, 56**).

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

COUTO, J. P. C.; CAVALCANTE, A. R.; SILVA, N. D.; BORGES, T. K. S. Estimativa diária da evapotranspiração e do coeficiente de cultivo simples e dual para a cultura da beterraba. In: XXV – CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM. São Cristóvão: **Anais... CONIRD**, 2015.

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

DORIA, B. R. S.; TAVARES, L. O. G. de S.; RAMOS, F. S. de M.; SOUZA, J. A.; SANTOS, D. M.; FACCIOLI, G. G. Determinação da demanda hídrica das culturas cenoura e beterraba, irrigadas com água residuárias em condições de casa de vegetação em São Cristóvão-SE. In: XXV – CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM. São Cristóvão: **Anais**.

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DOS COEFICIENTES DE CULTIVO DA CULTURA DA BETERRABA**

CONIRD, 2015.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. Roma: FAO. 1979. 193 p. (**Technical note**, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Crop water requirements. Rome: FAO, 1977. (**Irrigation and drainage paper**, 24).

KOBAYASHI, B.F.; VALERIANO, T.T.B.; OLIVEIRA, A.F.; SANTANA, M.J.; BORGES, R.M. Estimativa da evapotranspiração da cultura do trigo cultivado em Uberaba, MG. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 5, 2018.

LIBARDI, V. C. M. **Efeitos de diferentes níveis de irrigação e do déficit hídrico na produção do feijoeiro**. 1996. 49 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

LIMA JÚNIOR, J.C.; ARRAES, F.D.D.; OLIVEIRA, J.B.; NASCIMENTO, F.A.L.; MACÊDO, K.G. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 3, 2016.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resource Research**. v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

OLIVEIRA NETO, D.H; CARVALHO DF; SILVA LDB; GUERRA JGM; CEDDIA MB. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da beterraba orgânica sob cobertura morta de leguminosa e gramínea. **Horticultura Brasileira** v. 29, p. 330-334, 2011.

PEREIRA, F.F.S.; DAL PAI, E.; MONTENEGRO, R.J.V.; ROMÁN, R.M.S.; GONZÁLEZ, A.M.G.O.; ESCOBEDO, J.F. Estudo comparativo da evapotranspiração de referência entre localidades no Estado de São Paulo e na província de Habana. **Irriga**, v. 21, n. 2, 2016.

SALES, R.A.; OLIVEIRA, E.C.; LIMA, M.J.A.; GELCER, E.M.; SANTOS, R.A.; LIMA, C.F. Ajuste dos coeficientes das equações de estimativa da evapotranspiração de referência para São Mateus, ES. **Irriga**, v. 23, n. 1, 2018.

SCHWENCK, V.A.; QUEIROZ, L.S.; GARCIA, A.D.B.; LEITE, K.J.; ARNDT, S.; OLIVEIRA, E.M. Coeficiente de cultura por lisimetria da variedade de sorgo forrageiro SF-15 (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 2, 2020.

SILVA, A.O.S.; KLAR, A.E.; SILVA, E.F.F.; CUNHA, A.R. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo para a beterraba. **Irriga**, v. 19, n. 3, 2014.

SOUZA, A. P., DE ALMEIDA, F. T., ARANTES, K. R., MARTIM, C. C., SILVA, J. O. Coeficientes de Tanque Classe A para estimativa da evapotranspiração de referência diária na região de transição Cerrado-Amazônica. **Scientia Plena**, v. 11, n. 5, 2015.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 4, p. 892-898, 1980.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2 p. 184–194, 1981.