

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR ESTIMADA PELO ALGORITMO SAFER

RODOLFO FERNANDES MUSSI¹; JOSÉ ALVES JÚNIOR²; ADÃO WAGNER PEGO EVANGELISTA²; DERBLAI CASAROLI² E RAFAEL BATTISTI²

¹ *Mestre em Agronomia: Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás - UFG, Av. Esperança s/n, Campus Samambaia, CEP 74.690-900, Goiânia, Goiás, Brasil, e-mail: rodolfof.mussi@gmail.com*

² *Professores Doutores: Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás - UFG, Av. Esperança s/n, Campus Samambaia, CEP 74.690-900, Goiânia, Goiás, Brasil, e-mails: jose.junior@pq.cnpq.br, awpego@pq.cnpq.br, derblaicasaroli@pq.cnpq.br, battisti@ufg.br*

1 RESUMO

A cana-de-açúcar é a principal cultura irrigada no Brasil, necessitando de uma precipitação acumulada durante seu ciclo de 1.000 mm ano⁻¹. O uso do sensoriamento remoto associado com imagens orbitais e algoritmos auxilia na estimativa da evapotranspiração quando aliado a modelos físicos. O SAFER é um algoritmo simplificado quando comparado com outros similares relatados pela literatura, como é o caso dos algoritmos SEBAL e S-SEBI, pois baseia-se na equação de Penman-Monteith para obter a evapotranspiração, sendo esse o principal fator para a escolha deste algoritmo neste trabalho. Assim, o estudo teve o objetivo de estimar a evapotranspiração atual da cultura de cana-de-açúcar pelo modelo de balanço de energia SAFER utilizando imagens do satélite Landsat 8, e comparar com método de balanço de água no solo (ETBHS) utilizando sensores de umidade do solo e evapotranspiração de referência. O estudo foi no município de Goianésia/Go, no período de Junho/2015 a Julho/2016, em solo de textura média em área irrigada por pivô central de 100 hectares com cana de primeiro ciclo (variedade IAC 91-1099). Os resultados mostraram que para estimativa da evapotranspiração de cana-de-açúcar o método SAFER superestimou o ETBHS em 22,89 %, apesar da significativa correlação ($R^2= 0,77$) entre os dois métodos.

Keywords: *Saccharum officinarum* L., sensoriamento remoto, necessidade hídrica, cerrado.

MUSSI, R. F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; BATTISTI, R.
SUGARCANE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATED BY SAFER ALGORITHM FOR EVAPOTRANSPIRATION RETRIEVING

2 ABSTRACT

Sugarcane is the main irrigated crop in Brazil, requiring cumulative rainfall during its 1,000 mm year⁻¹ cycle. The use of remote sensing associated with orbital images and algorithms, aid in the estimation of evapotranspiration when combined with physical models. SAFER is a simplified algorithm when compared to similar ones reported in the literature, as is the case of SEBAL and S-SEBI algorithms, since it is based on the Penman-Monteith equation to obtain evapotranspiration, which is the main reason for choosing this algorithm in this study. Thus,

this study aimed to estimate the current evapotranspiration of sugarcane crop by the SAFER energy balance model using images from the Landsat 8 satellite, and comparison with soil water balance method (ETBHS) using soil moisture sensors and reference evapotranspiration. The study was carried out in Goianésia / Go, Brazil from June/2015 to July/2016, in medium textured soil in an irrigated area of 100 ha central pivot, with first cycle sugarcane (IAC 91-1099 variety). The results showed that for the estimation of sugarcane evapotranspiration the SAFER method overestimated the ETBHS by 22.89%, despite the significant correlation ($R^2=0.77$) between the two methods.

Keywords: *Saccharum officinarum* L., remote sensing, water requirement, Brazilian Cerrado.

3 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, sendo o setor sucroenergético um dos mais importantes para o agronegócio brasileiro, correspondendo a cerca de 2% do Produto Interno Bruto. A cana-de-açúcar é a principal matéria prima para a produção do açúcar e do etanol e, nos últimos anos também utilizada para produção de energia elétrica (CANA-DE-AÇÚCAR, 2019).

A produção de cana em vários estados encontra-se em expansão, sobretudo em Goiás, o segundo maior produtor nacional (CANA-DE-AÇÚCAR, 2019). Entretanto, o relatório da OECD e FAO (2015) afirma que alguns fatores podem dificultar a expansão, com destaque para condições climáticas adversas que podem reduzir as produtividades médias. Um desses fatores é o acentuado déficit hídrico que ocorre em ambientes que não eram cultivados com a cultura e que agora foram incorporados para cultivo de cana-de-açúcar desde 2003. E muitas destas regiões de expansão estão em Goiás (CANAPLAN, 2015). Assim, o desenvolvimento de pesquisas que auxiliem seu cultivo irrigado será um fator determinante para o aumento da produção e ampliação de novas áreas de cultivo.

A produtividade de cana-de-açúcar em Goiás tem sido, frequentemente, prejudicada pela irregularidade das chuvas. A média de produtividade dos últimos 10

anos não passa de 75 t/ha, acima da média nacional, 70 t/ha (CANA-DE-AÇÚCAR, 2019), porém, abaixo de importantes regiões paulistas (>90 t/ha) (ASHRAF; FOOLAD, 2007). Em anos com baixos níveis pluviométricos, algumas regiões goianas não chegam a 60 t/ha (CANA-DE-AÇÚCAR 2016), como é o caso da região de Goianésia no Vale do São Patrício.

Assim, alguns estudos (DANTAS NETO et al., 2006; CAMPOS et al., 2014, ARAUJO et al., 2016) revelam que a irrigação associada ao seu manejo correto auxilia no aumento de produtividade e qualidade da produção. A cana-de-açúcar é a principal cultura irrigada no Brasil (mais de 25% de toda área irrigada no país), necessitando de uma precipitação acumulada durante seu ciclo de 1.000 mm ano⁻¹ (DOORENBOS; KASSAM, 1994). Assim, a evapotranspiração é uma informação fundamental para se realizar o planejamento, o projeto hidráulico, o manejo da água ao longo do ciclo e a gestão dos recursos hídricos para cultura (DANTAS NETO et al., 2005).

O planejamento de irrigação baseado em valores empíricos do coeficiente de cultivo (K_c) pode aumentar os custos de produção, reduzir a qualidade do produto e o rendimento. Neste sentido, muitos estudos têm sido conduzidos para se obter K_c mais apropriados de acordo com as condições locais, utilizando diferentes técnicas, tais como lisímetro (ALVES JÚNIOR, et al., 2007; BARBOZA JUNIOR, 2007), método

do balanço de energia (SILVA et al., 2007; SALES et al., 2016; SOUZA, 2016) e o método do balanço hídrico (CRUZ et al., 2005; SOUZA, 2016).

O uso do sensoriamento remoto associado com imagens orbitais é outro método para a determinação da evapotranspiração (BASTIAANSEN et al., 1998; ALLEN et al., 2007; GOWDA et al., 2008; KALMAN; MCVICAR; MCCABE, 2008). Algoritmos utilizados em imagens orbitais auxiliam na estimativa da evapotranspiração quando aliado a modelos físicos (ANDRADE et al., 2014). Dentre esses algoritmos, destaca-se, o SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) (BASTIAANSEN et al., 1998), o SEBS - Surface Energy Balance System (SU, 2002), METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration) (ALLEN et al., 2007) e SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) (TEIXEIRA et al., 2013).

O SAFER é um algoritmo simplificado quando comparado com os outros que também são utilizados para determinar evapotranspiração atual da cultura, pois ele é baseado na equação de Penman-Monteith para obter a evapotranspiração, sendo esse fator o principal para a escolha deste algoritmo. O algoritmo tem como grande vantagem a utilização de dados meteorológicos

provenientes de vários tipos de estações meteorológicas e o uso não obrigatório de bandas termais (TEIXEIRA et al., 2013).

Dessa maneira, o objetivo deste estudo foi determinar a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar (primeiro ciclo), bem como os respectivos coeficientes de cultura (K_c) para a região do Vale do São Patrício em Goiás, por balanço de energia (utilizando o sensoriamento remoto aliado ao algoritmo SAFER) e por balanço hídrico (monitorando a atmosfera e a água no solo).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no município de Goianésia/GO (Vale do São Patrício), coordenadas $15^{\circ} 15' S$, longitude $48^{\circ} 51' W$ e altitude de 640 m, em uma área irrigada, cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), variedade IAC91-1099 em primeiro ciclo (cana planta) safra 2015/2016. O equipamento de irrigação utilizado foi um sistema de aspersão do tipo pivô central, irrigando de forma plena (reposição de 100% da necessidade hídrica da cultura) uma área de 100 ha. O clima da região, pela classificação de Köppen, é do tipo Aw denominado tropical de savana, com inverno seco e verão chuvoso. A região apresenta precipitação média igual 1540 mm por ano com temperaturas médias anuais de 22 a 25 °C.

Figura 1. Local de coleta de dados para pesquisa - coordenadas geográficas $15^{\circ}15'57,75 S$; $48^{\circ}51'12,9 O$, Goianésia, GO; Marcadores indicam o centro do pivô e os três pontos de instalação de sensores de monitoramento de umidade do solo e precipitação (chuva e irrigação).



Utilizou-se o aplicativo Irriger® para o manejo da irrigação, com o qual se determinou a demanda hídrica da cana-de-açúcar, utilizando-se coeficientes de ajuste (coeficiente da cultura “Kc”, e do solo “Ks”) sobre a evapotranspiração de referência (ET₀). Calculou-se a lâmina bruta de irrigação por meio de um balanço hídrico simplificado, considerando-se como entradas de água a irrigação e a precipitação pluvial efetiva e as saídas, a evapotranspiração da cultura (ET_c), além da profundidade considerada para o sistema radicular. O solo foi classificado como LATASSOLO Vermelho Amarelo distroférrico. O aplicativo Irriger®, estima a evapotranspiração com base nos elementos meteorológicos disponíveis (radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa do ar), por meio do modelo de Penman Monteith-FAO 56 (ALLEN et al., 1998). Os dados meteorológicos utilizados para a realização do experimento foram obtidos na estação meteorológica automática instalada 17 km da área experimental, distância bem abaixo do máximo recomendado que é de 50 km.

A estimativa da evapotranspiração bem como os respectivos coeficientes de cultura (K_c) foram obtidos através de imagens do satélite LANDSAT 8, obtidas de forma gratuita no banco de imagens do United States Geological Survey (2016). As imagens foram obtidas a partir de 14 dias após o plantio das mudas da cana-de-açúcar, no dia 24/06/2015, até o final do ciclo da cultura com um intervalo de 16 em 16 dias, sendo a frequência de passagem do satélite até atingir 398 dias após o transplantio das mudas.

Após a obtenção das imagens orbitais bem como os seus respectivos tratamentos prévios, elas foram importadas para o software Arc Gis®10.2.2 e com auxílio do algoritmo SAFER determinado os valores médios das variáveis biofísicas que compõe a evapotranspiração atual e os respectivos coeficientes de cultura. Com a

ferramenta de programação e cálculo utilizou-se a função *raster calculator* disponível no software gerenciador de Sistema de Informações Geográficas (SIG) que permite o cálculo e aplicação da modelagem através de dados raster.

Dentro do SAFER, o albedo de superfície (a_s) foi estimada de acordo com o albedo no topo da atmosfera (α₀) (Equação 1).

$$a_s = a \cdot a_0 + b \quad (01)$$

Em que a e b são coeficientes de regressão correspondentes aos valores de 0,7 e 0,006, respectivamente (TEIXEIRA, 2010). A temperatura de superfície (T₀) foi estimada pela Equação 2:

$$T_0 = a * meanT \text{ kelvin} + b \quad (02)$$

Em que a e b são coeficientes de correção, cujos valores são 1,11 e -31,89, respectivamente (TEIXEIRA, 2010). Depois, o Diferença Normalizada Índice de Vegetação (NDVI) foi estimada pela Equação 3:

$$NDVI = \frac{IVP-V}{IVP+V} \quad (03)$$

Onde IVP é reflexão de luz no infravermelho próximo V e reflectância na faixa vermelha. Posteriormente, os dados de albedo de superfície (α₀), a temperatura da superfície (T₀) e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) foram utilizados para calcular valores instantâneos da relação ET / ET₀, conforme a Equação 4:

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{a_0 * NDVI} \right) \right] \quad (04)$$

O coeficiente "a" foi usado com o valor de 1,0 (TEIXEIRA et al., 2013; HERNANDEZ et al., 2014), o qual foi determinado para a região Noroeste do Estado de São Paulo (Noroeste Paulista), provando ser bem adaptado para as

condições da zona estudada. O " b " coeficiente foi obtido por Teixeira (2010) e corresponde ao valor de - 0,008. ET_0 é a evapotranspiração de referência, dada em milímetros por dia ($mm\ d^{-1}$) pelo método de Penman -Monteith, de acordo com a FAO Boletim N° 56 (ALLEN et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot (Rn-G) + \left[yx \frac{900}{T+273} \right] \cdot u_2 \cdot (es-ea)}{\Delta + y \cdot (1+0,34 \cdot u_2)} \quad (05)$$

Onde: G é a densidade de fluxo de calor no solo ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$), T é a média diária da Temperatura do ar ($^{\circ}C$), u_2 representa a velocidade do vento a 2 m (ms^{-1}), es é a pressão de vapor do ar saturado (kPa) e ea a pressão de vapor real do ar (kPa), $es - ea$ é o déficit de saturação do ar (kPa), Δ é o gradiente da curva de pressão de vapor do ar na atmosfera ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$) e y é a constante psicrométrica ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$). Subsequentemente, valores instantâneos relação ET / ET_0 foram multiplicados por valores de ET_0 diários, obtendo a evapotranspiração real (ET):

$$ETa = \frac{ET}{ET_0} \cdot ET_0 \quad (06)$$

A estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar foi de acordo com o método da FAO no Boletim N°. 56 (ALLEN et al., 1998), pela Equação:

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (07)$$

Onde ET_c é a evapotranspiração da cultura (mm / dia); ET_0 é a evapotranspiração de referência ($mm\ dia^{-1}$) e K_c é o coeficiente de cultura (sem dimensão) - FAO N°. 56 (ALLEN et al., 1998).

Para a determinação do balanço hídrico foram instalados quatro sensores do tipo FDR, modelo EC-5 da Decagon Devices, nas profundidades de 0,15, 0,35, 0,55, e 0,75 m e três repetições (pontos distintos da área). Foi realizada a calibração

dos sensores como sugerido pelo fabricante, que compara a umidade volumétrica medida pelos sensores (FDR), com os valores obtidos pelo método gravimétrico. A calibração dos sensores seguiu a recomendação do fabricante, Decagon, para expressar com maior exatidão os dados coletados através do datalogger Emb50 na área experimental. Para a realização da calibração dos sensores, foram coletadas amostras indeformadas em cada profundidade de instalação dos sensores em cilindros com dimensões de 0,07 m x 0,15m (diâmetro x altura) e em seguida levada para a estufa a uma temperatura de 105° C até as amostras atingirem pesos constantes para a determinação da densidade.

O balanço hídrico em determinado volume de solo e pela lei de conservação das massas, num certo período de tempo (LIBARDI, 2005), é descrito pela Equação 8.

$$P + I \pm R \pm \Delta ARM - ET = 0 \quad (08)$$

Sendo P – precipitação pluvial (mm); I – irrigação (mm); Q – fluxo subsuperficial (mm); podendo ser ascendente (+) ou descendente (-) na base limite inferior do volume de controle; R – escoamento superficial (mm); ΔARM – variação de armazenamento de água no perfil de solo (mm); ET – evapotranspiração (mm).

Esta equação, porém, é usualmente rearranjada para deixar a evapotranspiração (ET, mm) como variável dependente (Equação 9):

$$ET = \Delta ARM - (P \pm Q \pm R) \quad (09)$$

Considerou-se que não houve escoamento superficial de água, devido ao solo apresentar declive suave e ser naturalmente bem drenado. Para registro da precipitação foram instalados 3 pluviômetros de balança modelo ECRN 5 da Decagon Devices, a 2,0 m de altura. Estes pluviômetros possuem uma área de captação

de 50 cm² e uma báscula de 5 cm³, com 1 mm de resoluo. Cada bateria de sensores e o pluvimetro foram conectados a um datalogger EM-50 da Decagon Devices, sendo as leituras realizadas a cada hora.

O armazenamento acumulado de água no solo foi calculado pela regra 3/8 de Simpson, considerando que as medidas foram realizadas em intervalos igualmente espaçados, desde a superfície (z = 0) até a profundidade de interesse (z = L) (LIBARDI, 2005).

$$ARM = \int_0^L \theta(Z) dZ = \frac{Z}{3} (\theta_0 + 4\theta_1 + \theta_2) \quad (10)$$

Sendo θ o conteúdo de água do solo, obtido com os sensores tipo FDR.

A variao no armazenamento de água no perfil de solo (ΔARM) foi determinada pela diferença dos valores do conteúdo de água do solo obtidos nos tempos inicial e final de cada período considerado, sendo expressa pela (Eq. 11):

$$\Delta ARM = [\theta_f - \theta_i]L = A_f - A_i \quad (11)$$

Sendo A_f e A_i os armazenamentos acumulados de água final e inicial, respectivamente.

O fluxo total de gua (Q), ou seja, as perdas por drenagem (-Q) ou os ganhos por ascenso capilar (+Q), de água da zona radicular por meio do limite inferior do volume de solo estudado (z = 0,80 m), respectivamente, foram determinados a partir da Equao 12:

$$Q = \int_0^t qtd = q \int_0^t dt = q(t - 0) = q\Delta t \quad (12)$$

Sendo q (mm d⁻¹) a densidade de fluxo de água no limite inferior do volume de solo delimitado pela zona radicular e dt o intervalo de tempo de estudo do balanço hídrico. As densidades de fluxo q foram

estimadas com base na equao de Darcy-Buckingham (Equao 13).

$$Q = -K(\theta) \frac{\Delta\psi_r}{\Delta Z} \quad (13)$$

Sendo $K(\theta)$ (mm.d⁻¹) a condutividade hidráulica no saturada e $\Delta\psi_t/\Delta Z$ o gradiente de potencial total em z = 0,55 m, obtido pela Equao 14 abaixo:

$$\frac{\Delta\psi_t}{\Delta z} = \frac{\psi_{r0,15m} - \omega_{r0,75m}}{\Delta z} \quad (14)$$

Sendo ψ_t o potencial total da água no solo ($\psi_t = \psi_m + \psi_g$) e ΔZ igual a 0,80 m. O potencial gravitacional ψ_g (m de água) foi definido pela posio no solo, ou seja, igual  profundidade Z; e o potencial matricial ψ_m (m de água), por meio da equao de Van Genuchten (1980) e dos dados da curva de reteno e dados da umidade atual do solo.

A curva de reteno foi obtida em laboratrio usando-se centrífuga. Os dados das curvas de reteno da água no solo foram ajustados pela equao proposta por Van Genuchten (1980) (Equao 15).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha x \psi_m|^n]^{1 - \frac{1}{n}}} \quad (15)$$

O desempenho do método de estimativa de evapotranspirao pelo algoritmo (SAFER) foi avaliado correlacionando-se os dados estimados pelo sensoriamento remoto com os determinados através do balanço hídrico de água no solo (ETBHS) através de uma análise de regresso linear em que se consideraram os indicadores estatísticos, R-quadrado (Eq. 16), coeficiente de correlao simples de Pearson "r" (Eq. 17) e pelo ndice de Willmontt "d". O ndice de concordância de Willmontt está relacionado ao afastamento dos valores estimados em relao aos observados, variando de zero para nenhuma concordância, a 1,0 para a concordância perfeita, sendo determinado pela Equao 18 (SILVA; MIZIARA, 2011).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma(O_i - E_i)^2}{\Sigma(O_i - O)^2} \tag{16}$$

$$r = \sqrt{1 - \frac{\Sigma(O_i - E_i)^2}{\Sigma(O_i - O)^2}} \tag{17}$$

$$d = 1 - \left[\frac{\Sigma(P_i - O_i)^2}{\Sigma(|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \tag{18}$$

Sendo O_i o valor observado (ET_r estimada pelo balanço hídrico do solo), mm; E_i o valor estimado (ET_r obtida pelo SAFER), mm; O média dos valores observados, mm.

O ciclo total da cultura (cana planta / 1º. ciclo) foi de 398 dias (Tabela 1).

Fase 1 - Pegamento: 20 dias (do transplântio ao pegamento das mudas);

Fase 2 - Perfilhamento: 80 dias (do pegamento das mudas ao pleno perfilhamento);

Fase 3 - Desenvolvimento: 240 dias (do pleno perfilhamento ao início da maturação); e

Fase 4 - Maturação: 58 dias (do início ao fim da maturação). Neste período foram realizadas 3 irrigações até o corte da cana-de-açúcar.

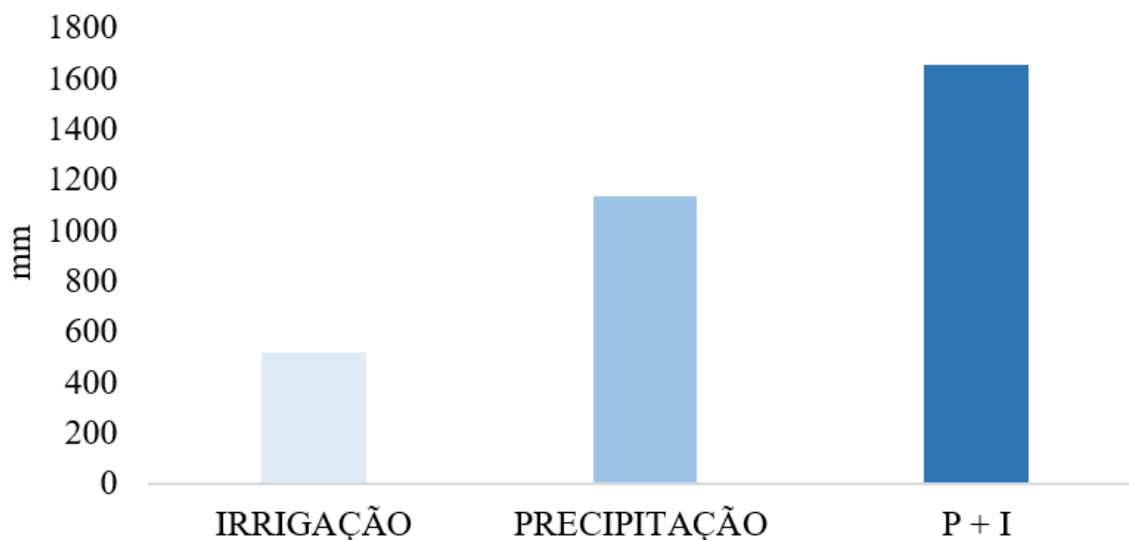
Tabela 1. Período, em dias, para cada fase de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar (IAC 91-1099), Goianésia, GO.

Período	Pegamento	Perfilhamento	Desenvolvimento	Maturação	Total
Fase	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	
Início	10/06/2015	01/07/2015	19/09/2015	16/05/2016	
Final	30/06/2015	18/09/2015	15/05/2016	12/07/2016	
Período (dias)	20	80	240	58	398

Como observa-se na Figura 2, a precipitação pluviométrica ao longo do período do cultivo da cana-de-açúcar foi de 1140,1 mm, concentrada de outubro/2015 a março/2016, não necessitando, portanto, de nenhuma irrigação nesse período chuvoso. O total de irrigação aplicada foi de 516,77 mm,

repondo 413,41 mm no armazenamento de água no solo (80% eficiência), nos dois períodos de estiagem: os quatro primeiros meses (junho a setembro/2015) e os quatro meses finais (abril a julho/2016) do ciclo da cana.

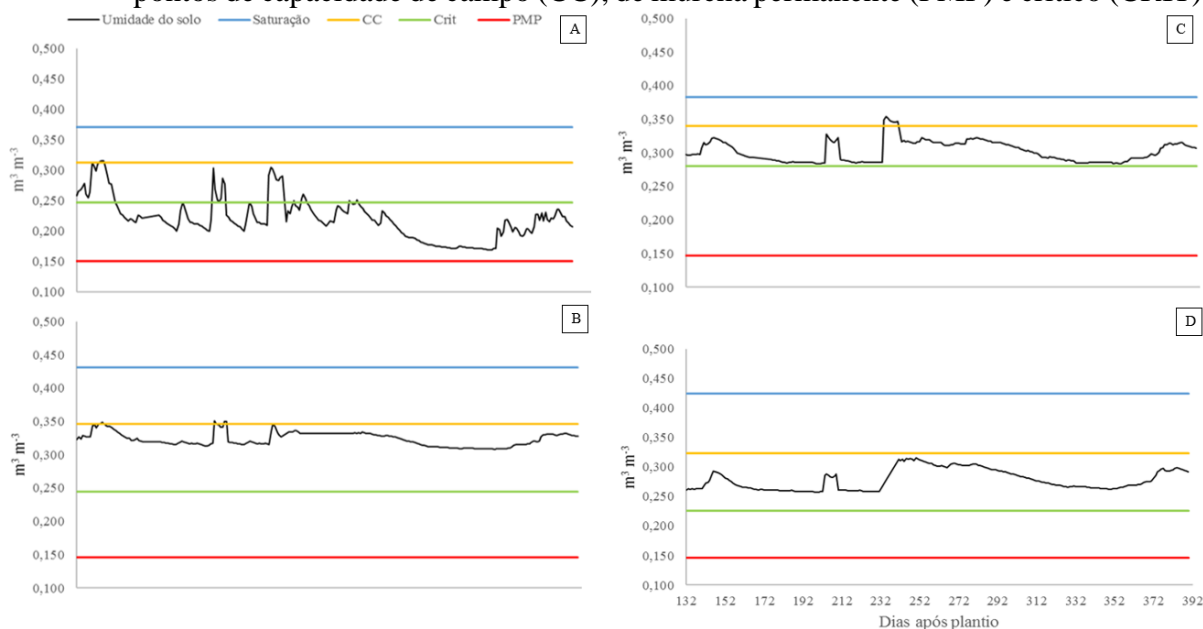
Figura 2. Representação da lâmina acumulada de irrigação, precipitação e a soma total de irrigação e precipitação (P + I).



De acordo com o manejo da irrigação realizado na área, observa-se que não houve restrição hídrica para as plantas ao longo do

ciclo. Isso pode ser confirmado pelos dados de conteúdo de água no solo no perfil até 0,75 m (Figura 4).

Figura 3. Conteúdo de água no perfil do solo, a 0,15 (A), 0,35 (B), 0,55 (C) e 0,75 (D) m de profundidade, ao longo do ciclo (398 dias) em Goianésia, GO. Destaque para os pontos de capacidade de campo (CC), de murcha permanente (PMP) e crítico (CRIT).



Para o período entre março a julho/2016 (período predominantemente sem chuvas e sem presença de nuvens) foi possível comparar melhor os três métodos. O método SAFER, novamente, teve uma

tendência de superestimativa em alguns dias atingindo até 57,14% em relação a ETBHS. Observa-se que pelo SAFER em 07 e 23 de abril de 2016 as evapotranspirações foram estimadas em 3,5 e 2,8 mm dia⁻¹,

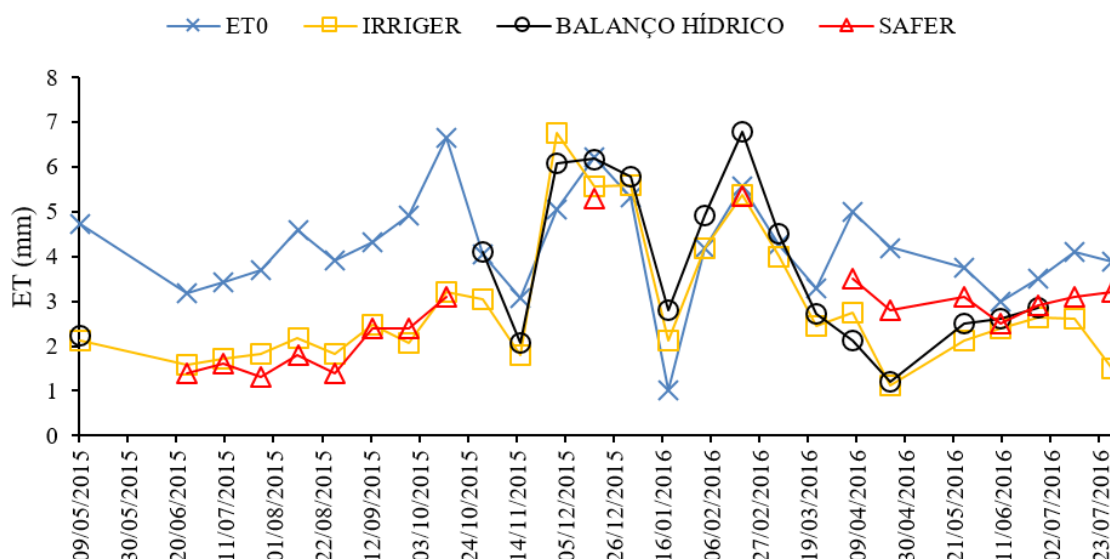
respectivamente. Enquanto, pelo ETBHS foram estimadas em 2,12 e 1,2 mm dia⁻¹, seguindo essa tendência até o final do ciclo (Figura 3).

Comparando os métodos ETBHS e IRRIGER, a evapotranspiração baseada no Kc da IRRIGER obteve uma superestimativa menor do que o método SAFER, em que atingiu no máximo 23,18% em relação ao ETBHS. Observa-se que na data de 07 de abril de 2016 a FAO 56 estimou 2,76 mm dia⁻¹, enquanto a ETBHS estimou em 2,12

mm dia⁻¹. Essa superestimativa no final do ciclo da cultura é explicado pela alta ocorrência de tombamentos das plantas devido a presença de rajadas de ventos, desta forma, o algoritmo estimou a evapotranspiração baseado na temperatura de palhada e de colmos, sendo que o normal é baseado na temperatura foliar.

O método SAFER ao longo do ciclo superestimou ETBHS em 22,89 % enquanto método baseado na IRRIGER superestimou ETBHS em 12,54 %.

Figura 4. Evapotranspiração da cultura pelos diferentes métodos (SAFER, ETBHS e IRRIGER) no período de outubro de 2015 a junho de 2016 em cultura de cana-de-açúcar na cidade de Goianésia – GO.



Na Tabela 2, mostra os valores de evapotranspiração de referência (ET₀), evapotranspiração da cultura (ET_c) pelos

métodos IRRIGER, SAFER e balanço de água no solo, ao longo do ciclo da cana-de-açúcar.

Tabela 2. Evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar (IAC91-1099) nas datas e pontos amostrados nas imagens Landsat 8. Goianésia, GO, 2015-2016.

DAP	DATA	Kc (*)	Kc SAFER	KS	ET ₀	ETa	ETa	ETa
						IRRIGER	ETBHS	SAFER
(mm dia ⁻¹)								
14	24/06/15	0,50	0,40	1,00	3,19	1,59	-	1,40
30	10/07/15	0,50	0,42	1,00	3,42	1,71	-	1,60
46	26/07/15	0,50	0,45	1,00	3,69	1,84	-	1,30
62	11/08/15	0,52	0,50	0,92	4,59	2,19	-	1,80
78	27/08/15	0,59	0,55	0,78	3,91	1,82	-	1,40
94	12/09/15	0,68	0,63	0,85	4,31	2,49	-	2,40
110	28/09/15	0,76	0,72	0,56	4,91	2,08	-	2,40
126	14/10/15	0,84	0,80	0,57	6,66	3,20	-	3,10
142	30/10/15	0,92	-	0,82	4,06	3,05	4,10	-
158	15/11/15	1,00	-	0,58	3,08	1,79	2,08	-
174	01/12/15	1,08	-	0,69	5,06	6,77	6,09	-
190	17/12/15	1,08	1,02	0,82	6,23	5,57	6,18	5,30
206	02/01/16	1,05	-	1,00	5,33	5,61	6,75	-
222	18/01/16	1,02	-	1,00	1,02	2,12	2,81	-
238	03/02/16	1,00	-	1,00	4,19	4,18	4,92	-
254	19/02/16	0,99	0,98	1,00	5,57	5,39	6,80	5,35
270	06/03/16	0,94	-	1,00	4,27	4,01	4,51	-
286	22/03/16	0,91	-	0,82	3,30	2,46	2,72	-
302	07/04/16	0,88	0,94	0,62	4,99	2,76	2,12	3,80
318	23/04/16	0,85	0,87	0,31	4,20	1,12	1,20	2,80
334	09/05/15	0,84	-	0,70	4,72	2,12	2,24	-
350	25/05/16	0,80	0,84	0,69	3,74	2,13	2,51	3,10
366	10/06/16	0,80	0,81	1,00	3,00	2,40	2,60	2,50
382	26/06/16	0,80	0,80	0,94	3,51	2,64	2,85	2,90
398	12/07/16	0,80	0,80	0,80	4,11	2,61	-	3,10
414	28/07/16	0,80	0,74	0,49	3,88	1,51	-	3,20

*Coeficiente de cultura tradicionalmente utilizado pela usina.

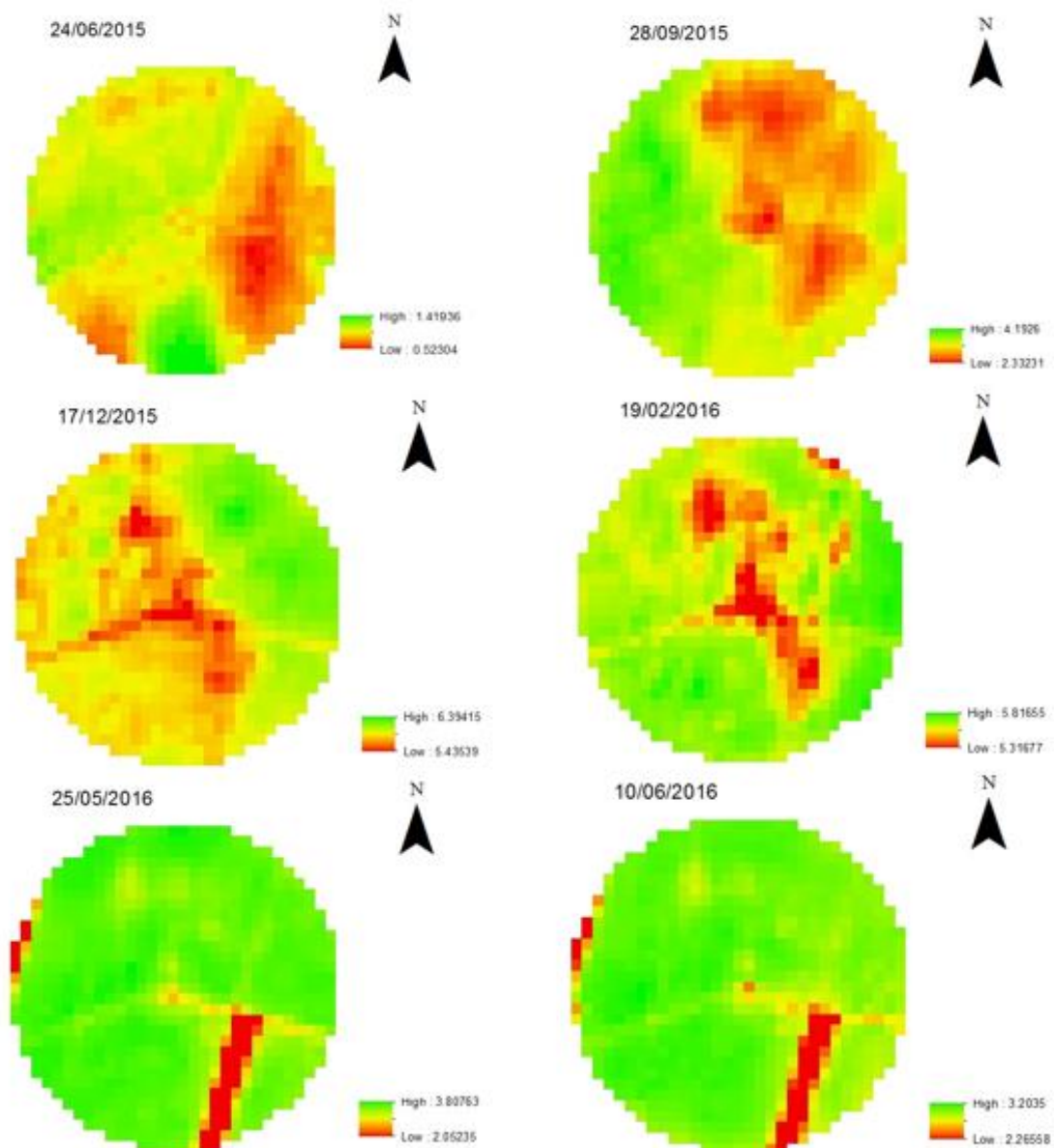
A Figura 5 mostra os mapas gerados de ETa a partir do SAFER, durante o ciclo da cultura de junho/2015 a julho/2016. De acordo com a variação do estágio de desenvolvimento da cultura, ocorre também a variação da evapotranspiração atual da cultura (ETa). Observa-se que os maiores valores de ETa foram encontrados no período em que a cultura da cana-de-açúcar encontrava-se em pleno desenvolvimento, entre os meses de dezembro/2015 e janeiro/2016 em que a ETa atingiu valores

próximos de 6 mm e o acumulado nesse período foi de 324,7 mm. Os menores valores foram encontrados no período de estabelecimento da cultura, também chamado de fase inicial em que o acumulado nesse período foi de 54,11 mm. Após 300 dias do transplante das mudas em campo, a ETa começou a ter um decréscimo saindo de 4,7 mm dia⁻¹ seguindo assim até o final do ciclo onde a ETa foi de 3,2 mm dia⁻¹. Esse fato está associado ao início da senescência das plantas, no qual ocorre uma redução do

índice de área foliar e como consequência a redução da ETa. Nas primeiras imagens, nota-se que há uma grande heterogeneidade, causada pela não cobertura total do solo dado a juvenilidade das plantas, e por falhas no plantio dentro da área do pivô, ocasionando faixas sem a cobertura vegetal

principalmente na parte central das imagens. As imagens trazem tons de cores diferentes derivadas do vermelho e verde, em que, as faixas de vermelho correspondem a menores valores e a verde com maiores valores de ETa.

Figura 5. Mapas de evapotranspiração atual pelo modelo SAFER referente ao período de junho de 2015 a julho de 2016, cultura de cana-de-açúcar irrigada por pivô central, Goianésia, GO.



A evolução dos componentes do balanço hídrico do solo é apresentada na Tabela 3. O armazenamento de água no solo (ΔArm) corresponde ao saldo de água no solo, no intervalo de tempo considerado; se as entradas (precipitação e ascensão capilar) de água no volume de solo forem maiores que as saídas (evapotranspiração e drenagem) o ΔArm será positivo, caso

contrário será negativa. A variação de armazenamento apresentou uma variação de -0,026 a -2,801 nos meses de abril e junho, respectivamente. Os maiores valores de armazenamento ocorreram quando foram realizadas irrigações e/ou ocorreu precipitações nos dias que antecederam os subperíodos.

Tabela 3. Componentes do balanço hídrico em cana-de-açúcar de 21 de outubro de 2015 a 3 de agosto de 2016 na camada de 0-0,55 m, Goianésia, GO.

Subperíodo	ΔArm (mm dia ⁻¹)	P (mm dia ⁻¹)	ETa* (mm dia ⁻¹)
21/10/2015	-1,637	0	-6,363
06/11/2015	-2,504	0	-5,504
22/11/2015	-0,281	0	-8,281
08/12/2015	-0,495	0	-0,495
24/12/2015	-0,349	0	-0,349
09/01/2016	0,622	4	-9,622
25/01/2016	-0,064	0	-0,064
10/02/2016	-1,843	0	-6,157
26/02/2016	-0,472	0	-4,254
13/03/2016	0,846	1	-10,528
29/03/2016	-0,274	0	-0,846
14/04/2016	-0,036	0	-0,274
30/04/2016	-0,026	0	-0,036
16/05/2016	-1,142	0	-0,026
01/06/2016	-2,801	0	-5,142
17/06/2016	-0,679	0	-9,801
03/07/2016	-0,886	0	-0,679

*Evapotranspiração atual pelo método do balanço de água do solo (ETBHS)

Quando se observa a ET_a , nota-se que os maiores valores foram encontrados também quando teve ocorrência de chuva ou irrigação nos dias anteriores ou no próprio dia do subperíodo, fazendo com que o solo estivesse com um maior volume de água armazenado, como nota-se nos dias 09/01 e 13/03 de 2016. Resultados semelhantes foram obtidos por Oliveira et al. (2019).

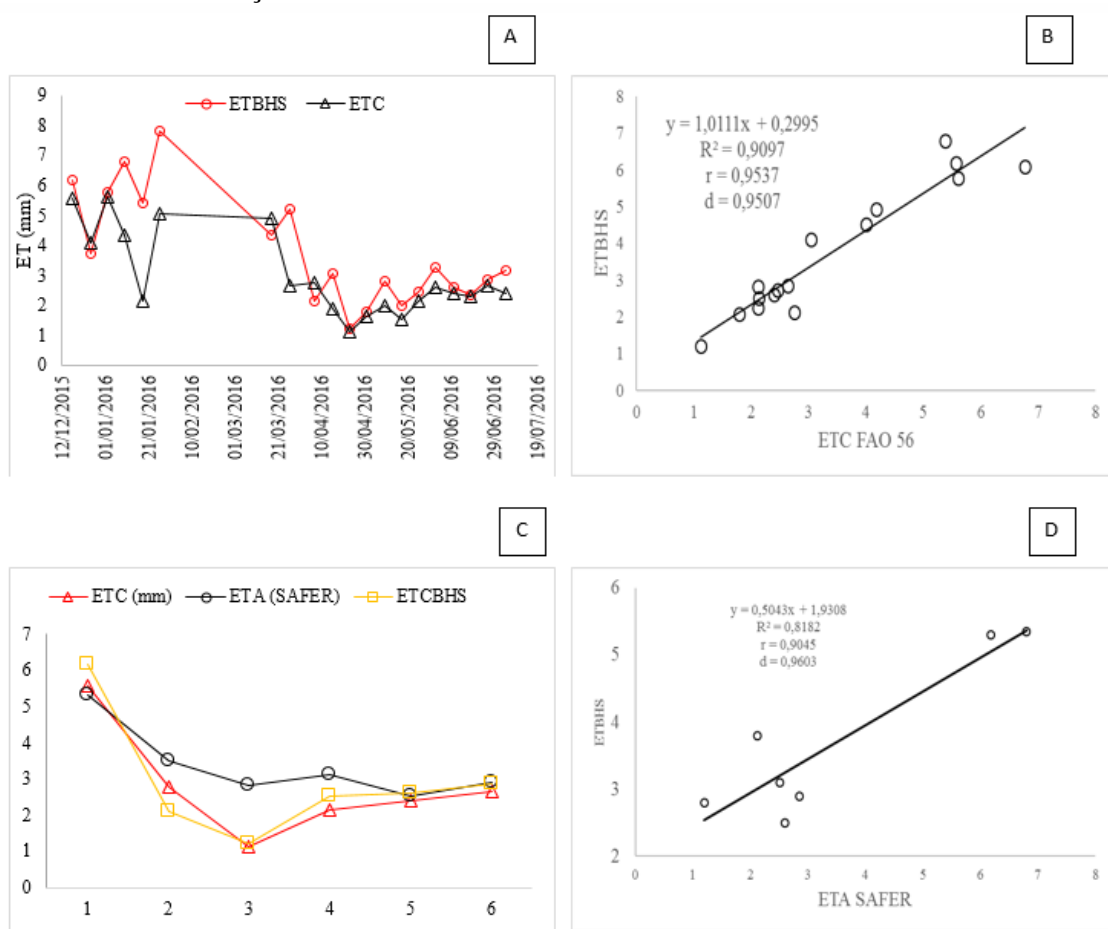
Quando se compara a evapotranspiração obtida através do balanço hídrico do solo (ETBHS) com a evapotranspiração da IRRIGER nota-se uma similaridade nos dados (Figura 18 A) entre os meses de dezembro de 2015 e julho de

2016. Há uma relação moderada entre os dados (Figura 5 B), apresentando “R²” de 0,9097, “r” de 0,9537 e “d” de Willmott de 0,9507. A evapotranspiração obtida pelo SAFER obteve uma boa correlação com os dados de evapotranspiração obtidos através do balanço hídrico do solo, obtendo um “R²” de 0,8182; “r” de 0,9045 e “d” de Willmott de 0,9603. Souza (2016) trabalhando com cana-de-açúcar em sequeiro, com o clima semelhante ao do estudo, obteve resultados semelhantes, o método para a estimativa de evapotranspiração pelo SAFER foi classificado como muito bom, apresentando o “R²” de 0,90, “r” de 0,95 e “d” de Willmott

de 0,88. O monitoramento da quantidade de água no solo através dos sensores de umidade começou em outubro de 2015, desta forma o comparativo dos dados de ETa SAFER e ETBHS não pôde ser realizado durante todo o ciclo da cultura, ressalta-se ainda a ocorrência de nuvens em algumas determinadas datas de passagem do satélite, reduzindo ainda mais a quantidade de dados

comparados. De forma geral, a maioria dos dados são de quando a cultura da cana-de-açúcar já se encontrava em pleno desenvolvimento e no período em que a cultura começou a entrar em senescência. Sendo assim, os valores de ETa tenderam a superestimar os dados quando comparados a ETc FAO e ETBHS.

Figura 5. A e B: Comparativo entre ET_C IRRIGER e ETBHS ao longo do ciclo da cultura da cana-de-açúcar; C: Evapotranspiração atual da cana-de-açúcar (IAC 91 – 1099) estimada pelo SAFER (ET_{SAFER}), balanço hídrico ETcBHS e ET_C IRRIGER, Goianésia, GO, 2015/2016 e D: Comparativo da evapotranspiração pelo balanço hídrico do solo (ETcBHS), e a ETc SAFER, ao longo do ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar.



6 CONCLUSÃO

A cultura da cana-de-açúcar (variedade IAC 91-1099) apresentou uma demanda hídrica estimada de 1077,56 mm e

1278,9 mm, ao longo de todo o ciclo (Junho/2015 a julho/2016), pelos métodos FAO 56 e SAFER, respectivamente. Em geral, o método SAFER superestimou a

evapotranspiração quando comparada com método de ETBHS em 22,89 %.

Apesar da superestimativa do método SAFER em relação ao ETBHS, o método pode ser indicado para estimar a evapotranspiração também na cultura da cana-de-açúcar, pois no período em que a cultura necessita de maior cuidado em relação a irrigação o método apresentou significativa correlação de dados ($R^2=0,77$).

7 AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa de Goiás (FAPEG) pelo auxílio financeiro para realização deste estudo, a CAPES pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor, a equipe da Usina Jalles Machado pelo apoio na coleta de dados.

8 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (Studies FAO Irrigation and Drainage 56).
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 133, n. 2, p. 380-394, 2007.
- ALVES JÚNIOR, J.; FOLEGATTI, M. V.; PARSONS, L. R.; BANDARANAYAKE, W.; SILVA, C. R.; SILVA, T. J. A.; CAMPECHE, L. F. S. M. Determination of the crop coefficient for grafted 'Tahiti' lime trees and soil evaporation coefficient of Rhodic Kandudalf clay soil in São Paulo, Brazil. **Irrigation Science**, Berlin, v. 25, n. 4, p. 419-28, 2007.
- ANDRADE, R. G.; TEIXEIRA, A. H. C.; SANO, E. E.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. C.; NOGUEIRA, S. F. Pasture evapotranspiration as indicators of degradation in the Brazilian Savanna. A case study for Alto Tocantins watershed. **SPIE remote sensing symposium**, Amsterdam, v. 16, n.1, p. 92391Z-1-92391Z-7, 2014.
- ARAÚJO, R.; ALVES JUNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P. Variação na qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar em decorrência da suspensão da irrigação antes da colheita e da ocorrência de baixas temperaturas. **Bragantia**, Campinas, v. 75, n. 1, p. 118-127. 2016.
- ASHRAF, M.; FOOLAD, M. R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 59, n. 2, p. 206-216, 2007.
- BARBOZA JÚNIOR, C. R. A. **Evapotranspiração da lima-ácida 'Tahiti' (Citrus latifolia Tan.) determinada por lisimetria de pesagem**. 2007. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) I. Formulation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212, n. 1, p. 198-212, 1998.

CANAPLAN. **Agronegócio Brasileiro: Cana-de-Açúcar Visão de curto prazo - Safras 2015/16 a 2017/18**. Piracicaba: Canaplan Consultoria Técnica, 2015. Disponível em: <http://canaplan.com.br/escopo-detalhado.pdf>. Acesso em: 15 Mai 2019.

CAMPOS, F. P.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; FONTOURA, P. R.; EVANGELISTA, A. W. P. Variedades de cana-de-açúcar submetidas à irrigação suplementar no cerrado goiano. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 6, p. 1139-1149, 2014.

CANA-DE-AÇÚCAR. **Acompanhamento da Safra Brasileira: cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v. 4, n. 2, p. 1-73, 2019. Safra 2018/19, Segundo levantamento. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_08_24_08_59_54_boletim_cana_portugues_-_2o_lev_-_18-19.pdf. Acesso em: 12 abr. 2020.

CANA-DE-AÇÚCAR. **Acompanhamento da Safra Brasileira: cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v. 3, n. 3, p. 1-17, dez. 2016. Safra 2016/17, Terceiro levantamento. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/safra/conab-3-levantamento-safra-2016-17-cana-de-acucar-191217>. Acesso em: 20 Nov 2018.

CRUZ, A. C. R.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L. A.; ROCHA, G. C. Balanço de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 1-10, 2005.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, H. M.; FRIZZONE, J. A.; ANDRADE, J. **Planejamento de irrigação: análise de decisão de investimento**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 283-288, 2006.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: FAO, 1994.

GOWDA, P. H.; CHAVEZ, J. L.; COLAIZZI, P. D.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A.; TOLK, J. A. ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. **Irrigation Science**, New York, v. 26, n. 2, p. 223-237, 2008.

HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C.; NEALE, C. M. U.; TAGHVAEIAN, S. Large scale actual evapotranspiration using agro-meteorological and remote sensing data in the northwest of Sao Paulo State, Brazil. **Acta Horticulturae**, Lisbon, v. 1038, n. 3, p. 263-270, 2014.

KALMAN, J. D.; MCVICAR, T. R.; MCCABE, M. F. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. **Surveys in Geophysics**, Oxford, v. 29, n. 1, p. 421-469, 2008.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 3. ed. Piracicaba: ESALQ, 2005.

OLIVEIRA, D. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; BISPO, R. C.; TEIXEIRA, A. H. C. Aplicação do algoritmo SAFER para determinação da evapotranspiração em canaviais irrigados por diferentes sistemas. **Irriga**, Botucatu, v. 1, n. 1, p. 1-7, out. 2019.

OECD; FAO. **Agricultural Outlook 2015-2024**. Paris: OECD Publishing, 2015.
SALES, D. L. A.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUZA, J. M. F.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; PEREIRA, R. M. Common bean evapotranspiration estimated by orbital images. **African Journal of Agricultural Research**, Chicago, v. 11, n. 10, p. 867-872, 2016.

SILVA, T. J. A.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, C. R.; ALVES JÚNIOR, J.; SILVA, E. M. B. Balanço de energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método da razão de Bowen. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 392-403. 2007.

SILVA, A. A.; MIZIARA, F. A expansão da fronteira agrícola em Goiás e a localização das usinas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 399-407, 2011.

SOUZA, J. M. F. **Aplicação do algoritmo SAFER na obtenção da evapotranspiração atual das culturas em condições de Cerrado**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

SU, Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, Amsterdam, v. 6, n. 3, p. 85-99, 2002.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing an PenmanMonteith equation. **Remote Sensing**, Bellingham, v. 2, n. 5, p. 1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. **Modelagem espaço temporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013. (Documentos, 99).

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat project description**. Washington: USGS, 2016. Disponível em: http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php. Acesso em: 05 Set 2018.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v. 44, n. 2, p. 892-898, 1980.