

VALIDAÇÃO DO MODELO SAFER NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR

JOÃO MAURÍCIO FERNANDES SOUZA¹; JOSÉ ALVES JÚNIOR² DERBLAI CASAROLI²; ADÃO WAGNER PEGO EVANGELISTA² E MARCIO MESQUITA²

¹ Professor Doutor: Departamento de Agronomia, Centro Universitário de Anápolis – UniEvangélica, Av. Universitária Km 3,5, Cidade Universitária, CEP: 75083-515, Anápolis, Goiás, Brasil, e-mail: joaomfsouza@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, derblaicasaroli@pq.cnpq.br, awpego@pq.cnpq.br, márcio.mesquita@ufg.br

1 RESUMO

Métodos que possam determinar o balanço hídrico de culturas a partir de imagens de satélites se mostram muito úteis, pois são capazes de propiciar a sua determinação em áreas com grande heterogeneidade e dimensão. Objetivou-se realizar um comparativo entre o método de estimativa de evapotranspiração real (ET_r) obtida pelo SAFER (*Simple algorithm for evapotranspiration retrieving*), o balanço hídrico climatológico e de água no solo, de forma a validar a metodologia proposta como alternativa aos métodos tradicionais. O estudo foi realizado em Santo Antônio de Goiás-GO em área de 100 ha, com cana-de-açúcar (CTC-4) em sequeiro. A ET_r foi estimada utilizando imagens do satélite Landsat 8 e os resultados comparados com o balanço hídrico do solo e climático de maio a agosto de 2015. Em geral, os resultados de ET_r pelo SAFER, concordaram bem com os métodos tradicionais, estimando valores de ET_r em média 0,70 mm dia⁻¹ acima dos valores de estimativa obtidos com o balanço hídrico do solo e de 0,48 mm dia⁻¹ para o balanço hídrico climatológico. O sensoriamento remoto e o modelo agrometeorológico SAFER podem ser utilizados para estimar a ET_r da cana-de-açúcar na região, utilizando o ajuste $ET_r=0,87*ET_{SAFER}-0,51$ para o balanço hídrico do solo e o ajuste $ET_r=0,92*ET_{SAFER}-0,36$ para o balanço hídrico climático.

Keywords: déficit hídrico, necessidade hídrica, sensoriamento remoto, *Saccharum* spp.

SOUZA, J. M. F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.;
MESQUITA, M.

VALIDATION OF SAFER ALGORITHM TO ESTIMATE SUGARCANE CROP
EVAPOTRANSPIRATION

2 ABSTRACT

Methods that can determine the water balance of cultures from satellite images prove to be very useful because they can provide its determination in large areas with high heterogeneity. The aim of this study was to compare the real evapotranspiration (ET_r) estimation method obtained by SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*), to the climatological water balance and the soil water balance in order to validate the proposed methodology as an

alternative to traditional methods. The study was conducted in Santo Antônio de Goiás – GO, Brazil, in a non-irrigated area with 100 hectares, planted with sugarcane (CTC-4 variety). The ETr was estimated using Landsat 8 (OLI / TIRS) satellite images and the results compared to the soil water and climate balance in the period from May to August 2015. In general, the results estimated by SAFER corroborated those of traditional methods, estimating ETr values of 0.70 mm dia⁻¹, on average, above estimation values obtained with the soil water balance and 0.48 mm day⁻¹ for the climatic water balance. The evapotranspiration estimation method using remote sensing and the agro-meteorological model SAFER can be used to estimate actual evapotranspiration (ETr) of sugarcane in the Cerrado region, using the adjustment $ETr = 0.87 * ETr_{SAFER} - 0.51$ for the soil water balance and the adjustment $ETr = 0.92 * SAFER - 0.36$ for the climatological water balance.

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

3 INTRODUÇÃO

O Brasil é atualmente o país com a maior produção de cana-de-açúcar do mundo, com 23% da produção mundial. A produção de cana-de-açúcar na safra 2019/20 totalizou 642,70 milhões de toneladas representando aumento de 3,6% em relação a 2018/19. A produção brasileira concentra-se no Estado de São Paulo, (51,87%), seguido por Goiás (10,10%) e Minas Gerais (8,00%) (CONAB, 2020).

A disponibilidade de água para a cana-de-açúcar pode ser considerada como o principal causador da variabilidade de produtividade, ciclo após ciclo da cultura (MARIN et al., 2013). O déficit hídrico ocorrido em pelo menos cinco meses do ano (maio a setembro) limita a produtividade na região do Cerrado goiano, tendo como consequência uma baixa produtividade média, cerca de 70 t ha⁻¹, ficando abaixo de outras importantes regiões produtoras brasileiras, como São Paulo (77 t ha⁻¹).

Há relação linear entre a evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar com a produtividade (DALRI; CRUZ, 2008). O estresse hídrico causa danos no crescimento foliar e na produtividade da cana-de-açúcar, e dependem da intensidade e da duração do estresse, assim como do estágio fenológico

da cultura em que este ocorre, e da variedade cultivada (SOARES et al., 2008).

Para entender a real necessidade hídrica da cana-de-açúcar e o grau de influência das lâminas de déficit hídrico impostas a esta cultura na região do centro-oeste goiano, torna-se imprescindível o conhecimento da demanda por evapotranspiração, de modo a detectar qual ou quais as lâminas de déficit capazes de reduzir significativamente a produtividade desta cultura.

Dentre os métodos de obtenção da necessidade hídrica de plantas, destacam-se o método do balanço hídrico da cultura no campo. De acordo com Silva et al. (2014a), o balanço hídrico de um ambiente vegetado é a contabilização das entradas e saídas de água em dado volume de solo, durante certo período de tempo. Como limite superior desse volume tem-se a superfície do solo e como limite inferior tem-se a profundidade do sistema radicular da vegetação de interesse, podendo ser verificado déficit ou excesso de água no local considerado, com variações intra e interanuais.

Outro método utilizado para estimativa da evapotranspiração baseia-se na equação do balanço de energia à superfície e em técnicas de sensoriamento remoto (ALLEN et al., 2010; ELHADDAD; GARCIA; CHÁVEZ et al., 2011; ECHEVERRIA; FARIAS, 2012; TREZZA;

ALLEN; TASUMI et al., 2013; BASTIAANSEN et al., 2014; TEIXEIRA, 2012; TEIXEIRA; HERNANDEZ; LOPES et al., 2012, NAGLER et al., 2013; TEIXEIRA et al., 2017). Bezerra; Silva; Ferreira (2008) e Sales et al. (2016) citam que os dados obtidos através do sensoriamento remoto, para o cálculo dos fluxos de energia que ocorrem na interface solo-vegetação-atmosfera, utilizam-se de algoritmos para a obtenção desses elementos. Um desses algoritmos é o SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) que foi desenvolvido por Teixeira (2010).

O SAFER (TEIXEIRA, 2010) utiliza a correlação de alguns parâmetros calculados por sensoriamento remoto como albedo, NDVI e temperatura da superfície, com a evapotranspiração. A principal vantagem da estimativa de evapotranspiração utilizando sensoriamento remoto, em detrimento de outras perspectivas, como as que se baseiam na equação de Penman-Monteith, é que sua estimativa pode ser obtida exclusivamente por meio da equação de balanço de energia, não sendo necessário se conhecer dados da cobertura vegetal e do teor de água no solo (WARREN, 2012).

Assim, métodos que permitam realizar o balanço hídrico de superfícies vegetadas utilizando imagens de satélites parecem muito úteis, pois proporcionam a estimativa da evapotranspiração em áreas heterogêneas e com diferentes dimensões, diferente dos métodos micrometeorológicos, como o das correlações turbulentas e da razão de Bowen, e mesmo o uso de lisímetros. Apesar de precisos, estes métodos, apresentam resultados satisfatórios para áreas com culturas em mesmo estágio fenológico, mesma condição hídrica, densidade de plantio e, quando irrigadas, e mesmo sistema de irrigação.

Diversos autores estudaram a obtenção da evapotranspiração real (*E_{Tr}*) em

culturas utilizando sensoriamento remoto, contudo, a *E_{Tr}* diária obtida foi comparada apenas com o método padrão da FAO (ALLEN et al., 1998) a partir de dados oriundos de estações meteorológicas.

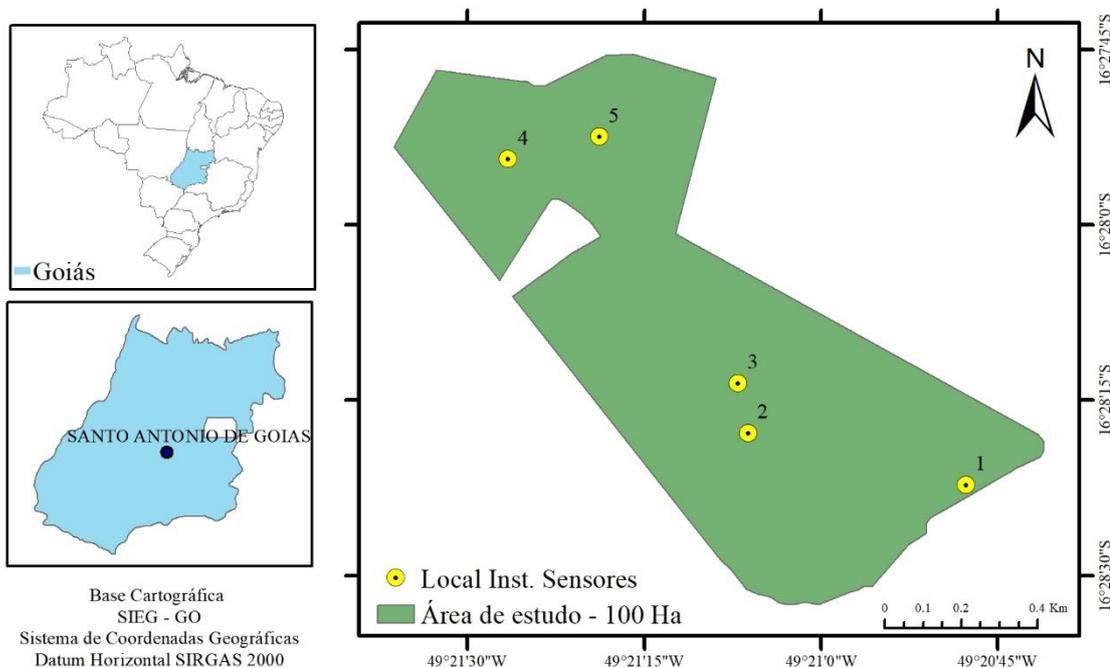
O objetivo deste estudo foi validar o modelo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) como método de estimativa da evapotranspiração real (*E_{Tr}*) da cana-de-açúcar.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no município de Santo Antônio de Goiás - GO (16° 29'S; 49° 18'W; 780 m) em área de aproximadamente 100 ha cultivados com cana-de-açúcar (variedade CTC-4), em estágio de 1ª soca (2ª colheita), sendo o plantio realizado em abril de 2013 (Figura 1), em sistema mecanizado, com mudas pré-brotadas e espaçamento de 1,5 m entre fileiras e o primeiro corte em setembro de 2014. Segundo a classificação de Köppen, o Município de Santo Antônio de Goiás, GO apresenta clima Aw, tropical de savana, megatérmico. A temperatura média anual do ar é de 23,0 °C e o mês de junho apresenta a menor média de temperatura mínima do ar (14,4 °C), enquanto o mês de setembro apresenta a maior média de temperatura máxima do ar (31,7 °C). O regime pluvial é bem definido, ou seja, período chuvoso de outubro a abril e período seco de maio a setembro. A precipitação pluvial média anual é de 1.498 mm, e a umidade relativa do ar, média anual, é de 70%, com o mês de agosto apresentando o menor índice (47%). A perda de água para a atmosfera, média anual, estimada pelo método de Penman Montheith é da ordem de 1.559 mm (SILVA et al., 2014b).

Figura 1. Localização da área de estudo em Santo Antônio de Goiás -GO (16° 29'S; 49° 18'W; 780 m), 100 ha cultivados com cana-de-açúcar (variedade CTC-4), em ciclo de 1ª soca (2ª colheita), com destaque para o local de instalação da estação meteorológica, dos sensores de umidade do solo e pluviômetros.

Localização da área de estudo



O solo predominante é o Latossolo Vermelho Distrófico, textura franco-argilo-arenosa, fase cerradão subperenifólio, relevo plano. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo nas camadas de 0,0-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 e 0,60-0,80 m, com cinco repetições, para obtenção da granulometria, matéria orgânica, densidade, porosidade, condutividade hidráulica e retenção de água.

O balanço hídrico do solo foi realizado no período de maio a agosto de 2015, totalizando 105 dias, o qual foi dividido em 7 subperíodos, referentes a passagem do satélite Landsat 8 (OLI/TIRS) órbita 220 e ponto 071, adquiridas gratuitamente no banco de imagens do United States Geological Survey (2015) com total aproveitamento das imagens, considerando como subperíodo o dia anterior e o da passagem do satélite.

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 1:

$$ET = \Delta ARM - (P \pm Q \pm R) \quad (1)$$

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), o termo irrigação foi considerado nulo, pois o trabalho foi realizado em condições de sequeiro. Considerou-se que não houve escoamento superficial de água, devido ao solo apresentar relevo plano e ser naturalmente bem drenado. Para registro da precipitação, foram instalados 5 pluviômetros de balsa modelo ECRN 5, a 2,0 m de altura.

A variação no armazenamento de água no solo foi calculada pela regra 3/8 de Simpson, considerando-se que as medidas foram realizadas em intervalos igualmente espaçados, desde a superfície ($z = 0$) até a profundidade de interesse ($z = L$) (LIBARDI, 2005), a partir da Equação 2, sendo θ o conteúdo de água do solo.

$$ARM = \int_0^L \theta(Z) dZ = \frac{Z}{3} (\theta_0 + 4\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

A variação 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 Equação 3:

$$\Delta ARM = [\theta_f - \theta_i] L = A_f - A_i \quad (3)$$

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

Para a determinação do balanço hídrico foram instalados quatro sensores do tipo FDR, modelo EC-5, nas profundidades de 0,20, 0,40, 0,60, e 0,80 m e cinco repetições em pontos distintos da área. Os sensores foram calibrados para o solo local.

O fluxo total de água (Q), ou seja, as perdas por drenagem ($-Q$) ou os ganhos por ascensão capilar ($+Q$), de água da zona radicular por meio do limite inferior do volume de solo estudado ($z = 0,60$ m), respectivamente, foram determinados a partir da Equação 4:

$$Q = \int_0^t q dt = q \int_0^t dt = q(t - 0) = q\Delta t \quad (4)$$

Em que q (mm dia^{-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 Equação de Darcy-Buckingham (Equação 5):

$$K_{sat} = q / \frac{d\psi_t}{dz} \quad (5)$$

Sendo q a densidade de fluxo e $d\psi_t/dz$ o gradiente de potencial total em $z = 0,60$ m, obtido pela Equação 6 abaixo:

$$\frac{\Delta\psi_t}{\Delta Z} = \frac{\psi_{t0,20m} - \psi_{t0,80m}}{\Delta Z} \quad (6)$$

ψ_t é definido como o potencial total da água no solo ($\psi_t = \psi_m + \psi_g$) e ΔZ igual a 0,20 m. O potencial gravitacional ψ_g (m de água) foi definido pela posição no solo, ou seja, igual à profundidade Z ; e o potencial matricial ψ_m (m de água), por meio da curva de retenção e dados da umidade atual do solo. A curva de retenção foi obtida em laboratório usando-se extrator de Richards.

A condutividade hidráulica do solo não saturado, $K(\theta)$, foi obtida por meio da Equação 7:

$$K(\theta) = K_s w^L \left[1 - \left(1 - w^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (7)$$

Em que K_s (mm.d^{-1}) a condutividade hidráulica do solo saturado; e n e m os parâmetros de ajuste da equação de Van Genuchten (1980) e w , foi obtido por meio da Equação 8.

$$w = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (8)$$

Para estimar a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s), foi utilizado o método do permeômetro de carga

constante, a partir da condução de 5 amostras a um sistema montado para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturada (YOUNGS, 1991).

A evapotranspiração de referência (ET_0) foi obtida pelo método de Penman-Monteith, padrão FAO (ALLEN et al., 1998). Os dados necessários (temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento) foram obtidos de uma estação meteorológica automática, situada a 7 km de distância da área de estudo ($16^\circ 30'S$; $49^\circ 17'W$; 828 m).

De posse dos dados para elaboração do balanço hídrico climatológico, empregou-se o método de Thornthwaite & Mather. Considerando os dados médios das curvas de retenção, da densidade do solo e do comprimento médio do sistema radicular ($Z=0,60$ m) nos pontos amostrados, foi utilizado para capacidade de água disponível (CAD) o valor de 100 mm. A partir da contabilização das entradas e saídas de água do sistema foi estimada a ET_r da cultura durante o ciclo da cana-de-açúcar, sendo considerados os valores obtidos nos dias de passagem do satélite Landsat 8.

Para a estimativa da ET_r pelo SAFER, foram selecionadas imagens do satélite Landsat 8 (OLI/TIRS) órbita 220 e ponto 071, referente aos seguintes dias julianos (DOY), 142, 158, 174, 190, 206, 222 e 238 adquiridas gratuitamente no banco de imagens do United States Geological Survey (2015).

Como ferramenta de programação e cálculo utilizou-se software gerenciador de Sistema de Informações Geográficas (SIG) ArcGIS 10.2 que permitiu o cálculo e aplicação da modelagem através de dados *raster*.

Para converter os valores quantizados e calibrados (DN) do sistema sensor LANDSAT 8 OLI (REN et al., 2014) para radiância e reflectância espectral, utilizou-se os coeficientes radiométricos disponibilizados no arquivo de metadados das imagens. Foi aplicado o método de

correção atmosférica DOS (Dark Object Subtraction) proposto por Chavez Júnior (1988, 1989), em que os dados referentes às radiâncias mínima (L_{min}) e máxima (L_{max}) e à irradiância (E) do sensor OLI foram atualizados de acordo com Chander; Markham; Helder (2009) sendo posteriormente realizada a conversão dos valores digitais em radiância espectral.

Pelo SAFER o albedo de superfície foi estimado pela Equação 9 utilizando os coeficientes propostos por Teixeira; Hernandez; Lopes (2012):

$$\alpha_0 = 0,7 \times \alpha_{top} + 0,06 \quad (9)$$

Sendo α_{top} o albedo no topo da atmosfera.

Para elaborar a carta de temperatura da superfície utilizaram-se as imagens do infravermelho termal das bandas 10 (faixa espectral de 10,6 a 11,19 μm) e 11 (faixa espectral de 11,5 a 12,51 μm) do sensor TIRS do satélite Landsat-8, com resolução espacial de 100 m.

A temperatura de superfície foi calculada pela Equação 10 Teixeira; Hernandez; Lopes (2012):

$$T_0 = 1,11 \times T_{bright} - 31,89 \quad (10)$$

Em que T_{bright} foi obtido a partir Equação 11 Teixeira; Hernandez; Lopes (2012):

$$T_{bright} = \frac{1260,56}{\ln\left(\frac{607,76}{L_{thermal} + 1}\right)} \quad (11)$$

Sendo que $L_{thermal}$ a radiância (L_λ) das bandas 10 e 11. Neste estudo foi utilizado a média das temperaturas obtidas a partir das bandas 10 e 11.

Em seguida estimou-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) pela Equação 12, como relatado por Teixeira; Hernandez; Lopes (2012):

$$NDVI = \frac{(\rho_5 - \rho_4)}{(\rho_5 + \rho_4)} \quad (12)$$

Em que ρ_5 a reflectância da banda 5 – infravermelho próximo; ρ_4 a reflectância da banda 4 – banda no vermelho.

Posteriormente os dados de albedo de superfície (α_0), temperatura de superfície (T_0) e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), foram utilizados para se calcular os valores instantâneos da relação ET/ET_0 (Equação 13).

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 \times NDVI} \right) \right] \quad (13)$$

A implementação foi baseada em (TEIXEIRA, 2012), em que a e b são coeficientes de regressão, com valores de 1,90 e -0,008, respectivamente. ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}). Para aplicação do SAFER na região do estudo, o coeficiente “a” da Equação 13 foi ajustado para 1,0 considerando-se a similaridade entre os valores de coeficiente de cultura (K_c), provenientes das diretrizes da FAO, geralmente adotadas pelos produtores, e os resultados da razão ET/ET_0 modelada nas porções mais úmidas em áreas irrigadas por pivô central na região do Cerrado goiano. O mesmo procedimento foi adotado por Hernandez et al. (2014) ao aplicar o algoritmo SAFER no noroeste paulista.

Em seguida os valores instantâneos dessa relação foram então multiplicados pelos valores diários da ET_0 , chegando assim à ET_r , como demonstrado na Equação 14:

$$ET_r = \frac{ET_r}{ET_0} \times ET_0 \quad (14)$$

Sendo ET_r a evapotranspiração real (mm dia^{-1}); ET_0 a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

O desempenho do método de estimativa de evapotranspiração pelo SAFER foi avaliado correlacionando os valores estimados pelo balanço hídrico do solo e climatológico e os valores estimados pelo SAFER. Para a comparação dos dados de estimativa de evapotranspiração pelo SAFER, os dados foram coletados pontualmente nos 5 pixels (30 x 30 m) referentes a área de instalação das baterias de sensores utilizadas para o monitoramento da variação no armazenamento da água no solo. A comparação dos resultados foi pelo erro padrão de estimativa (EPE), erro quadrático médio (EQM), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o erro médio absoluto (EMA).

A precisão dada pelo coeficiente de determinação (r^2), indicando o grau em que a regressão explica a soma do quadrado total. A exatidão mostra a aproximação dos valores estimados aos observados. A aproximação é observada pelo índice de concordância ou ajuste, dado pela letra “d” (WILLMOTT et al., 1985). Os valores variam de zero (sem concordância) a 1 (com concordância).

O desempenho do modelo também foi avaliado utilizando-se o índice de confiança ou desempenho (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997). O coeficiente c é interpretado de acordo com os referidos autores como: "ótimo" ($c > 0,85$); "muito bom" (c entre 0,76 e 0,85); "bom" (c entre 0,66 e 0,75); "mediano" (c entre 0,61 e 0,65), "sofrível" (c entre 0,51 e 0,60), "mau" (c entre 0,41 e 0,50) e "péssimo" ($c < 0,40$).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A evolução dos componentes do balanço hídrico do solo é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Componentes do balanço hídrico em cana-de-açúcar de 23 de maio a 27 de agosto de 2015 na camada de 0-0,60 m, Santo Antônio de Goiás, GO.

Subperíodo	DOY	ΔArm (mm dia ⁻¹)	P (mm dia ⁻¹)	Q (mm dia ⁻¹)	ET_r (mm dia ⁻¹)
22 - 23/05/2015	142	-1,844	0,00	-0,151	1,693
07 - 08/06/2015	158	-1,153	0,00	-0,037	1,116
23 - 24/06/2015	174	-0,307	0,00	-0,004	0,303
09 - 10/07/2015	190	-1,294	0,00	-0,006	1,288
25 - 26/07/2015	206	-0,422	0,00	-0,005	0,417
10 - 11/08/2015	222	-0,017	0,00	-0,006	0,011
26 - 27/08/2015	238	-0,014	0,00	-0,005	0,019

ΔArm (armazenamento de água no solo); P (precipitação); Q (fluxo de água no limite inferior do volume de solo); ET_r (evapotranspiração real); DOY (dias julianos).

A variação no ΔArm apresentou uma oscilação de -1,844 a -0,014 mm, apresentando os menores valores (-0,017 e -0,014) no mês de agosto, período este em que a cultura já apresentava sinais de senescência em fase final de maturação e período em que se observou déficit hídrico mais acentuado (Figura 1), com umidade média no perfil do solo bem abaixo da umidade crítica.

Para os valores do fluxo de água no limite inferior do volume de solo (Q), observou-se que ocorreu somente drenagem (valores negativos). De forma geral esses valores seguiram as variações do ΔArm com maior drenagem nos períodos de maio a junho. Os baixos valores de drenagem encontrados podem ser explicados pelo fato de em praticamente todo período de estudo a umidade volumétrica estar abaixo da capacidade de campo, ou seja, com água retida apenas nos microporos do solo (a água drenada é proveniente dos macroporos), contribuindo dessa forma para a pobre estimativa deste termo (NETTO et al., 2000).

Em relação à ET_r , observou-se que os maiores valores aconteceram nos

subperíodos de 22-23/05/2015, período em que havia um maior volume de água no solo tendo em vista que a última precipitação (30 mm) havia ocorrido 12 dias antes e no subperíodo de 09-10/07/2015, em que foi registrada uma precipitação de 2 mm no dia 08/07/2015 e outra precipitação de 1 mm no dia 13/07/2015. A precipitação média registrada nos 5 pluviômetros instalados na área durante o ciclo da cultura foi de 1272 mm. Brito; Libardi; Ghiberto (2009), relataram que a ET_r , da cana-de-açúcar em Jaboticabal e Pirassununga, SP, teve distribuição temporal da umidade do solo, devido a distribuição das chuvas.

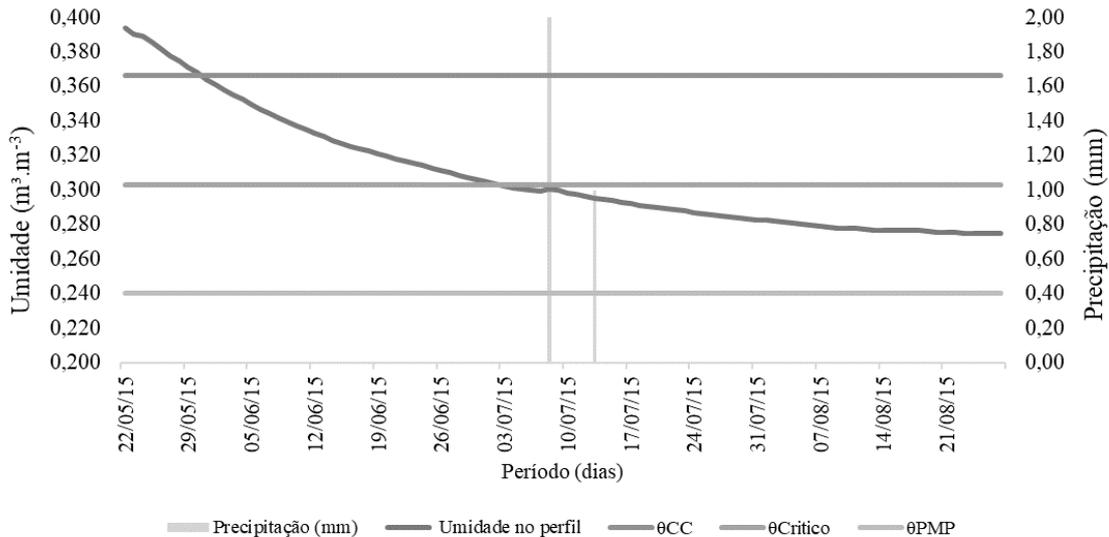
A Figura 2 ilustra os valores médios diários da precipitação pluvial (P), da variação na umidade do perfil (0,0-0,60 m) além dos valores médios da umidade na capacidade de campo (Θ_{CC}), umidade crítica ($\Theta_{Crítico}$) considerando um fator de disponibilidade de água no solo de 0,5 e umidade no ponto de murcha permanente (Θ_{PMP}), durante os subperíodos avaliados.

Verificou-se que após o dia 22/05/2015 houve uma diminuição do volume de água no solo, o que afetou diretamente a ET_r , com o volume de água no

solo se mantendo dentro da umidade crítica até o dia 09/07/2015 quando a cultura passou a sofrer com o déficit hídrico e consequentemente houve uma redução na ET_r . O decréscimo da ET_r no final do ciclo ocorre não somente devido às baixas

precipitações pluviais e a grande redução da evaporação de água do solo, mas também à senescência das folhas, reduzindo a área foliar e, consequentemente, a área exposta à transpiração (LIMA et al., 2011).

Figura 2. Valores médios diários da precipitação pluvial (P), da variação na umidade do perfil (0-0,60 m), valores médios de θ_{CC} , $\theta_{Crítico}$ e θ_{PMP} , no período de 22/05/2015 a 27/08/2015.



Na Tabela 2 são apresentados os valores de evapotranspiração real (ET_{BHC}) estimadas pelo balanço hídrico climatológico, utilizando os Kc para a cana-de-áçúcar (FAO 56), para evapotranspiração utilizando o SAFER (ET_{SAFER}) e para a evapotranspiração utilizando o balanço hídrico do solo (ET_{BHS}) em sete datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura de cana-de-áçúcar. De forma geral a ET_{SAFER} , apresentou valores superiores a ET_{BHC} e ET_{BHS} . Observa-se ainda que, de maneira geral, as curvas geradas a partir dos dados obtidos pela ET_{SAFER} e ET_{BHS} , ao longo do

período analisado seguem uma mesma tendência, o que reforça a concordância entre os dois métodos de obtenção da evapotranspiração real. Os valores de ET_{BHC} se mantiveram abaixo dos valores obtidos pelo SAFER, e apresentando valores decrescentes constantes ao longo do período avaliado. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato do balanço hídrico climatológico se tratar de um método matemático, diretamente influenciando pelos valores de Kc que apresentam comportamento decrescente com a aproximação da fase final da cultura.

Tabela 2. Evapotranspiração de referência (ET_0), Evapotranspiração real da cana-de-açúcar (ET_{SAFER}) nas datas e pontos amostrados nas imagens do satélite Landsat 8 em comparação com o balanço hídrico climatológico (ET_{BHC}) e o do solo (ET_{BHS}).

Data	DAB*	K_{CBHC}	K_{CSAFER}	ET_0	ET_{BHC}	ET_{BHS}	ET_{SAFER}
				(mm dia ⁻¹)			
23/05/2015	234	0,85	1,13	2,70	2,30	2,18	3,06
08/06/2015	250	0,57	0,59	3,20	1,82	1,18	1,90
24/06/2015	266	0,37	0,42	3,30	1,22	0,38	1,40
10/07/2015	282	0,25	0,45	3,60	0,90	1,17	1,64
26/07/2015	298	0,15	0,34	3,34	0,50	0,37	1,15
11/08/2015	314	0,08	0,25	3,80	0,29	0,14	0,85
27/08/2015	330	0,04	0,17	4,60	0,18	0,23	0,57

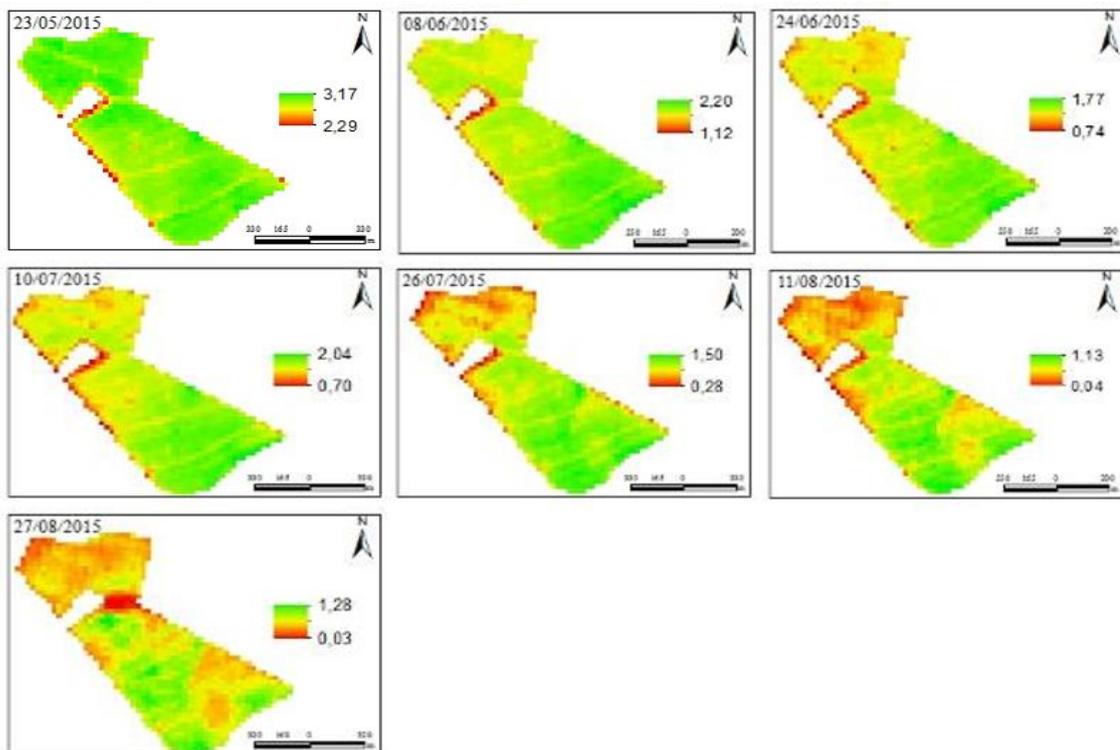
*DAB (dias após a brotação).

Os resultados deste estudo, estão de acordo com os apresentados por Teixeira et al. (2016) e Oliveira et al. (2019). Em que a aplicação do algoritmo SAFER em imagens de satélite na cultura da cana-de-açúcar no Cerrado, permitiu identificar variação da evapotranspiração atual, onde períodos com restrição hídrica apresentaram

menores valores de evapotranspiração quando comparadas a períodos sem restrição hídrica.

A Figura 3 apresenta a distribuição espacial dos valores da ET_{SAFER} (mm dia⁻¹) para a cana-de-açúcar nas datas de passagem do satélite Landsat 8 na área delimitada pelo estudo.

Figura 3. Evapotranspiração real da cana-de-açúcar (CTC 4) referente ao período de maio a agosto de 2015 obtida pelo SAFER na área delimitada para o estudo, utilizando imagem Landsat-8, Santo Antônio-GO, 2015.



Na Tabela 3 encontram-se os parâmetros da equação de regressão (a, b) coeficiente de determinação (r^2), erro médio absoluto (EMA), erro padrão de estimativa (EPE), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrático médio (RMSE), índice de concordância (d), coeficiente de correlação

simples de Person (r) e o índice de confiança ou desempenho (c) para valores de estimativa de evapotranspiração obtidas pelo balanço hídrico do solo, pelo balanço hídrico climatológico e o SAFER para a cultura da cana-de-açúcar.

Tabela 3. Parâmetros da equação de regressão (a, b) coeficiente de determinação (r^2), erro médio absoluto (EMA), erro padrão de estimativa (EPE), erro quadrático médio (EQM), raiz do erro quadrático médio (RMSE), índice de concordância (d), coeficiente de correlação simples de Person (r) e o índice de confiança ou desempenho (c) para valores de evapotranspiração obtidas pelos Balanços hídricos do solo e SAFER:

Balanço hídrico do solo e o balanço hídrico obtido pelo SAFER										
a	B	r^2	EMA	EPE	EQM	RMSE	d	R	C	Classificação
0,87	0,51	0,92	0,82	0,79	0,54	0,73	0,81	0,96	0,77	Muito bom
Balanço hídrico climatológico e o balanço hídrico obtido pelo SAFER.										
0,92	0,36	0,90	0,56	0,58	0,29	0,54	0,88	0,95	0,84	Muito bom

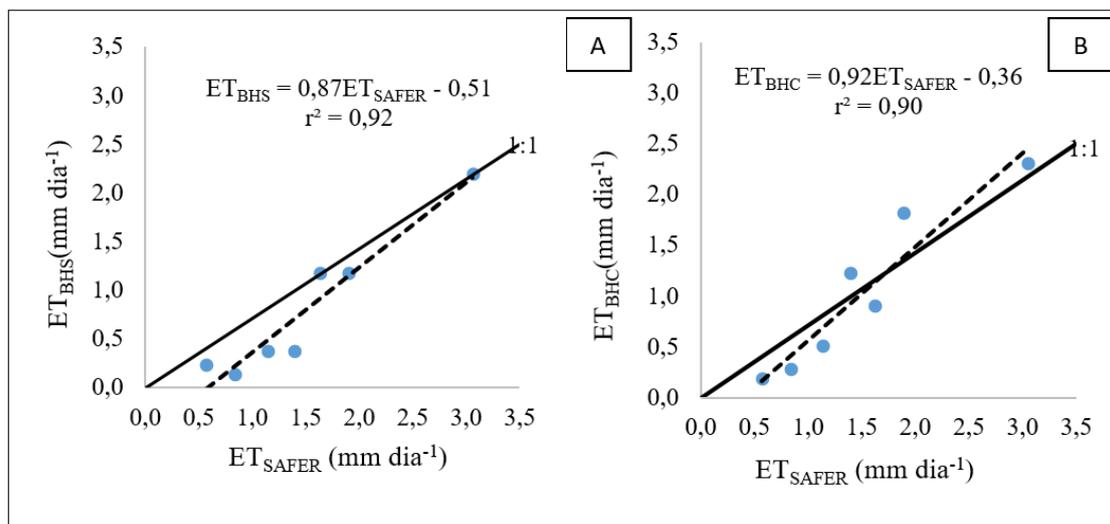
De acordo com os resultados obtidos para a estimativa de evapotranspiração pelo SAFER, o método pode ser classificado com desempenho “muito bom”, ou seja, com índices de concordância próximos da unidade, caracterizando uma concordância quase perfeita, em relação com a estimativa pelos balanços hídricos do solo e climatológico, respectivamente.

Em geral, os resultados da estimativa da ET_r pelo SAFER, concordaram bem com os balanços hídricos do solo e climatológico, respectivamente, com valores de EQM médios em torno de 0,54 e 0,29 mm dia⁻¹ e de RMSE em torno de 0,73 e 0,54 mm dia⁻¹. O EMA referente à lâmina evapotranspirada foi em média 0,82 e 0,56 mm dia⁻¹, enquanto que o EPE, foi em média 0,79 e 0,58 mm dia⁻¹.

Destaca-se, também, que as equações de regressão ($ET_{BHS} \times ET_{SAFER}$ e $ET_{BHC} \times ET_{SAFER}$) obtidas apresentam valores dos coeficientes *a* e *b* próximos da unidade, evidenciando um bom desempenho (Figura

4A e 4B). A correlação de Pearson “r” apresentou valores de $r = 0,96$ e $0,95$, respectivamente, muito próximos de 1,0 o que de acordo com Hopkins (2000) pode ser considerada quase perfeita, enquanto que para o r^2 apresentaram os valores de $r^2 = 0,92$ e $0,9$, respectivamente, indicando uma forte relação entre as variáveis analisadas. Sales et al. (2016) trabalhando com o feijoeiro, no cerrado, obtiveram uma boa correlação entre os dados estimados pelo SAFER e dados de evapotranspiração obtidos utilizando metodologia padrão, apresentando um “R²” de 0,98, “r” de 0,99 “d” de Willmott de 0,97 o que mostra que o SAFER estima bem evapotranspiração atual independente da cultura. Resultados semelhantes, e para mesma região, foram apresentados por Sales et al. (2017) para cultura do tomate industrial. O bom desempenho do SAFER para estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar, também foi relado por Teixeira et al. (2016), Mussi (2017), Oliveira et al. (2019).

Figura 4. Comparativo da evapotranspiração real, em datas diferentes ao longo do ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar, determinada pelo: A - balanço hídrico do solo (ET_{BHC}), e ET_{SAFER} , e B - balanço hídrico do solo (ET_{BHS}), e ET_{SAFER} .



De forma geral, o SAFER estimou valores de ET_r em média $0,70 \text{ mm dia}^{-1}$ acima dos valores de estimativa obtidos com o balanço hídrico do solo e de $0,48 \text{ mm dia}^{-1}$ para o balanço hídrico climatológico. A ordem de grandeza dos erros na estimativa de evapotranspiração real pelo SAFER é aceitável para fins de gestão dos recursos hídricos, principalmente considerando o baixo custo na obtenção da informação e a aplicação do método em larga escala.

Dessa forma, para correção da ET_r estimada pelo SAFER, recomenda-se a aplicação das equações de regressão obtidas neste estudo. As precisões alcançadas pelas estimativas de evapotranspiração obtidas pelo SAFER, são semelhantes e comparáveis aos desempenhos alcançados por algoritmos que utilizam técnicas de sensoriamento remoto e que são constituídos de metodologias de processamento bastante complexas a exemplo do SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998) e 1 (ALLEN; TASUMI, M.; TREZZA, 2007).

A dependência de dados de imagens de satélites representa uma limitação relevante na aplicação de modelos de estimativa de evapotranspiração uma vez que somente imagens livres da presença de

nuvens podem ser utilizadas. Outro fator a ser considerado é a escala temporal de aquisição dessas imagens, visto que para o Landsat 8 essa escala de obtenção de imagens é de 16 dias. Outro desafio para modelos que usam imagens de satélites para a obtenção da ET_r tornarem-se aplicáveis é a instalação de estações agrometeorológicas para a união de dados climáticos e parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, seguida de testes em ecossistemas diversos. Mas isso não pode ser considerado um problema já que também é uma exigência dos métodos micrometeorológicos. Portanto, a combinação destes dois métodos, sensoriamento remoto e micrometeorológico, pode ser utilizada (SOUZA, 2016).

6 CONCLUSÃO

O método de balanço de energia utilizando o sensoriamento remoto e o modelo agrometeorológico SAFER pode ser utilizado para estimar a evapotranspiração real (ET_r) da cana-de-açúcar (variedade CTC 4 em 1^a. soca) em cultivo de sequeiro

na região do Cerrado, utilizando o ajuste $ETr = 0,87 \cdot ET_{SAFER} - 0,51$ para o balanço hídrico do solo e o ajuste $ETr = 0,92 \cdot ET_{SAFER} - 0,36$ para o balanço hídrico climático.

7 AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa de Goiás (FAPEG) pelo auxílio financeiro para realização deste estudo, ao CNPq pela bolsa de doutorado concedida ao primeiro autor, e a equipe do Núcleo de Pesquisa em Clima e Recursos Hídricos do Cerrado 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. 4, p. 380-394, 2007.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; KJAERGAARD, J. **Mapping evapotranspiration at high resolution, application manual for Landsat satellite imagery**. Version 2.0.7. Kimberly: University of Idaho, 2010.
- 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.
- BASTIAANSEN, W. G.; KARIMI, P.; REBELO, L. M.; DUAN, Z.; SENAY, G.; MUTHUWATTE, L.; SMAKHTIN, V. Earth observation based assessment of the water production and water consumption of Nile Basin agro-ecosystems. **Remote Sensing**, Bellingham, v. 6, n. 1, p. 10306-10334, 2014.
- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais LANDSAT 5-TM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.
- BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; GIBERTO, P. J. Componentes do balanço de água no solo com cana-de-açúcar, com e sem adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 295-303, 2009.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 113, n.11, p. 893-903, 2009.

CHAVEZ JÚNIOR, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 24, n.1, p. 459-479, 1988.

CHAVEZ JÚNIOR, P. S. Radiometric calibration of Landsat thematic mapper multispectral images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, St. Louis, v. 55, n.9, p. 1285-1294, 1989.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v. 6, n.4, p. 1-58, abr. 2020 - Safra 2019/2020, Quarto levantamento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 25 jun 2020.

DALRI, A. B.; CRUZ, R. L. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 516-524, 2008.

ECHEVERRIA, C. P.; FARIAS, S. O. Calibration and validation of a remote sensing algorithm to estimate energy balance components and daily actual evapotranspiration over a drip-irrigated Merlot vineyard. **Irrigation Science**, New York, v. 30, n. 4, p. 537-553, 2012.

ELHADDAD, A.; GARCIA, L. A.; CHÁVEZ, J. L. Using a surface energy balance model to calculate spatially distributed actual evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 137, n. 1, p. 17-26, 2011.

FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. C. Water productivity of different land uses in watersheds assessed from satellite imagery Landsat 5 Thematic Mapper. *In: SPIE REMOTE SENSING*, 2014, Amsterdam. **Proceedings [...]**. Amsterdã: SPIE, 2014. p. 92392E-1-92392E-7.

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.

HOPKINS, W. G. **A new view of statistics: correlation coefficient**. [S. l.]: SportsScience.org, 2000. Disponível em: <http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>. Acesso em: 11 dez. 2015.

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

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; LIRA, C. A. B. O.; SOUZA, E. S.; SILVA, I. F. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. **Revista Ciência Agronômica**, Recife, v. 42, n.1, p. 65-74, 2011.

MARIN, F. R.; NASSIF, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 2, p. 232-239, 2013.

MUSSI, R. F. Evapotranspiração máxima da cana-de-açúcar estimada pelo algoritmo safer. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

NAGLER, P.; GLENN, E. P.; NGUYEN, U.; SCOTT, R. L.; DOODY, T. Estimating riparian and agricultural actual evapotranspiration by reference evapotranspiration and MODIS enhanced vegetation index. **Remote Sensing**, Bellingham, v. 5, n. 5, p. 3849-3871, 2013.

NETTO, A. M.; ANTONINO, A. C. D.; AUDRY, P.; CARNEIRO, C. J. G.; DALL'OLIO, A. Condutividade hidráulica não saturada de um Podzólico Amarelo da zona da mata norte de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 2, p. 1221-1228, 2000.

REN, H.; DU, C.; LIU, R.; QIN, Q.; MENG, J.; ZHAO-LIANG, L.; YAN, G. Evaluation of radiometric performance for the thermal infrared sensor onboard Landsat 8. **Remote Sensing**, Bellingham, v. 6, n. 1, p. 12776-12788, 2014.

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

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.

SALES, D. L. A.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; SOUZA, J. M. F. Estimativa de evapotranspiração e coeficiente de cultura do tomateiro industrial utilizando o algoritmo safer. **Irriga**. Botucatu, v. 22, n. 3, p. 529-940, 2017.

SILVA, R. A. B.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; GONDIM, P. S. S.; SOUZA, E. S.; BARROS JUNIOR, G. Balanço hídrico em NEOSSOLO REGOLÍTICO cultivado com braquiária. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 38, p. 147-157, 2014a.

SILVA, S. C.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. F.; AMORIM, A. O. **Informações Meteorológicas para Pesquisa e Planejamento Agrícola, Referentes ao Município de Santo Antônio de Goiás, GO, 2012**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2014b. (Documentos, 298).

SOARES, R. A. B.; OLIVEIRA, P. F. M.; CARDOSO, H. R.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A.; ROSENFELD, U. Efeito da irrigação sobre o desenvolvimento e a produtividade de duas variedades de cana-de-açúcar colhidas em início de safra. **STAB – Açúcar, Álcool & Subprodutos**, Piracicaba, v. 22, n. 4, p. 38-41, 2008.

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.

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

TEIXEIRA, A. H. C. Modelling evapotranspiration by remote sensing parameters and agrometeorological stations. *In: NEALE, C. M. U.; COSH, M. H. (ed.). Remote Sensing and Hydrology*. Wallingford: IAHS, 2012 p. 154-157.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L. Application of Landsat images for quantifying the energy balance under conditions of fast land use changes in the semi-arid region of Brazil. *In: SPIE REMOTE SENSING, 2012, Edimburgh. Proceedings [...]*. Edimburgh: SPIE, 2012. p. 1-10.

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M. Large-scale radiation and energy balances with Landsat 8 images and agrometeorological data in the Brazilian semiarid region. *Journal of Applied Remote Sensing*, New York, v. 11, n. 1, p. 016030.1 – 016030.15, 2017

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; RONQUIM, C. C.; VICTORIA, D. C. Sugarcane Water Productivity Assessments in the São Paulo state, Brazil. *International Journal of Remote Sensing Applications*, New York, v. 6, n.1, p. 84-95, jun. 2016.

TREZZA, R.; ALLEN, R. G.; TASUMI, M. Estimation of actual evapotranspiration along the middle Rio Grande of New Mexico using MODIS and Landsat imagery with the METRIC model. *Remote Sensing*, Bellingham, v. 5, n. 12, p. 5397-5423, 2013.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat project description**. Washington: USGS, 2015. Disponível em: http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php. Acesso em: 15 Ago 2015.

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

YOUNGS, E. G. Hydraulic conductivity of saturated soils. *In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (ed.). Soil analysis: physical methods*. New York: Marcel Dekker, 1991. Chap. 4, p. 161-207.

WARREN, M. S. Desagregação espacial de estimativas de evapotranspiração real obtidas a partir do sensor MODIS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Porto Alegre, v. 28, n. 2, p. 153-162, 2013.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.