

ADAPTAÇÃO DO ALGORITMO SAFER PARA IMAGENS LANDSAT 9

CÉSAR DE OLIVEIRA FERREIRA SILVA¹

¹ Stormgeo, Avenida Mutinga, 4935, CEP 05110-903, São Paulo, SP, Brasil, cesaroliveira.f.silva@gmail.com; ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-5152-6497>).

1 RESUMO

O algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) tem sido largamente aplicado utilizando imagens obtidas dos satélites MODIS, Sentinel-2 e Landsat-5, 7 e 8. Essa nota científica apresenta a adaptação do algoritmo SAFER para imagens do sensor OLI/Landsat-9, ainda não publicada. Os valores de ET_A estimados pelo método do SAFER apresentaram correlação de Pearson (r) estatisticamente significativo com os métodos FAO 56 e Embrapa (FAO 56, r = 0,96; Embrapa, r = 0,91).

Keywords: necessidade hídrica, imagens de satélite, irrigação

SILVA, C.O.F.

ADAPTING THE SAFER ALGORITHM FOR LANDSAT 9 IMAGES

2 ABSTRACT

The SAFER algorithm (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) has been widely applied to images obtained from the MODIS, Sentinel-2, and Landsat-5, 7, and 8 satellites. This scientific note presents the adaptation of the SAFER algorithm for images from the OLI/Landsat-9 sensor, which has not yet been published. ET_A values estimated via the SAFER method presented a statistically significant Pearson correlation coefficient (r) with the FAO 56 and Embrapa methods (FAO 56, r = 0.96; Embrapa, r = 0.91).

Keywords: water requirements; satellite images; irrigation

3 INTRODUÇÃO

Um abastecimento de água eficaz, por meio de irrigação precisa, é um dos caminhos para sustentar a agricultura com altos níveis de produtividade hídrica. Para avaliações do desempenho da irrigação, é importante distinguir os conceitos de evapotranspiração de referência (ET₀), real (ET_A) e potencial (ET_p), conforme adotado neste artigo. A ET₀ é considerada o fluxo de água de uma superfície de referência

gramada, com características específicas; a ET_A representa o fluxo de água considerando todas as condições ambientais; e a ET_p ocorre quando a cultura está sob condições ideais de umidade na zona radicular. A ET_A pode se desviar da ET_p devido ao estresse hídrico. Em pomares bem irrigados, os valores do índice de umidade da zona radicular, ET_A/ET₀, conhecido como coeficiente de cultura (K_c), podem ser utilizados para estimar as necessidades hídricas, ou seja, a ET_p. Os valores de K_c

distinguem lavouras da superfície gramada padrão, de acordo com os estágios fenológicos e as condições climáticas. Por outro lado, em situações não ideais, esse índice pode indicar estresse hídrico na cultura.

Uma maneira prática de realizar o manejo racional da irrigação é por meio da abordagem baseada no K_c . Valores desse coeficiente, voltados à melhoria do manejo da irrigação, foram determinados por meio de medições de campo no Brasil. No entanto, o sensoriamento remoto com imagens de satélite é uma alternativa poderosa para a modelagem do K_c , já aplicada em diferentes agroecossistemas brasileiros, utilizando índices de vegetação. O limite superior dos valores de ET_A/ET_0 , durante uma estação de crescimento ou ao longo de um ano, pode ser usado para ajustar uma curva representativa do K_c , permitindo estimar as necessidades hídricas da cultura, com o objetivo de avaliar o desempenho da irrigação. Entretanto, a redução da lâmina de irrigação, sem comprometer a produtividade, é desejável — especialmente em cenários de competição pelo uso da água entre a agricultura e outros setores. Diversos estudos relataram economia de água com manutenção da produtividade, por meio de estratégias de déficit hídrico em determinados estágios de desenvolvimento de laranjeiras, particularmente em regiões semiáridas.

Nas últimas décadas, tem-se observado uma crescente necessidade de estimar com precisão a demanda hídrica das plantas no setor agrícola, responsável por grande parte do consumo de água. Normalmente, considera-se que a quantidade de água consumida pelas plantas corresponde à soma da água evaporada do solo e transpirada pela vegetação. Tradicionalmente, a evapotranspiração é estimada por meio de modelos pontuais, como os de Penman-Monteith (PM), Priestley-Taylor, Hargreaves, Blaney-Criddle e a abordagem baseada em coeficientes de cultura (Hargreaves; Allen,

2003). Contudo, a estimativa da distribuição espacial da ET em grandes áreas é limitada pela baixa densidade das estações meteorológicas. Além disso, as culturas apresentam diferentes coeficientes ao longo dos estágios fenológicos, o que dificulta a estimativa dos coeficientes de cultura e a identificação dos estágios de desenvolvimento em áreas extensas, com grande diversidade de cultivos (Allen; Tasumi; Trezza, 2007a; Teixeira *et al.*, 2014; Silva; Teixeira; Manzione, 2019).

Algoritmos de sensoriamento remoto vêm sendo desenvolvidos para quantificar os componentes do balanço de energia e água, apresentando diferentes vantagens e limitações — como os algoritmos SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), S-SEBI e SEBS (Surface Energy Balance System). Esses modelos dispensam a necessidade de classificação do uso do solo, mas enfrentam limitações em condições chuvosas (Foolad *et al.*, 2018), como a dificuldade de identificar um pixel seco (necessário para encontrar um valor onde o balanço de energia encontra equilíbrio estático) e a exigência de bandas térmicas dos satélites (Conrad *et al.*, 2007). Para fins operacionais, a equação de Penman-Monteith (Allen, 2008) tem sido recomendada em conjunto com índices de vegetação obtidos via sensoriamento remoto e dados agrometeorológicos (Allen *et al.*, 2011). O uso dessa abordagem, aliado a técnicas de interpolação, é adequado para satélites com baixa resolução temporal, permitindo a análise de ciclos completos de culturas agrícolas (Allen; Tasumi; Trezza, 2007b).

Estudos indicam que a estimativa da ET_A com base em imagens de satélite é essencial para a avaliação espacial das necessidades hídricas das culturas e para a gestão racional do uso da água, especialmente em regiões com recursos hídricos limitados. Assim, diversos modelos de ET baseados em sensoriamento remoto foram desenvolvidos e testados sob

diferentes condições climáticas nos últimos anos. Considerando a aplicabilidade da equação de Penman-Monteith em larga escala, o algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) foi desenvolvido com base em medições de campo e dados de sensoriamento remoto, para estimar os componentes do balanço de energia e água (Teixeira *et al.*, 2014). Uma das vantagens do SAFER é que ele dispensa tanto a classificação do uso do solo quanto a seleção de pixels quentes, exigidas por outros modelos. Na versão atual do SAFER, é possível estimar os componentes do balanço de energia e água com ou sem o uso de bandas térmicas, permitindo análises em áreas irrigadas com resolução espacial de 30 metros, utilizando imagens do Landsat 8 (Silva; Teixeira; Manzione, 2019).

O objetivo do presente estudo foi aplicar o algoritmo SAFER a imagens do satélite Landsat 9, em conjunto com dados meteorológicos dos anos de 2024 e 2025, em uma área de estudo composta por sub-bacias hidrográficas com diferentes usos da terra, no município de Águas de Santa Bárbara, estado de São Paulo. Uma etapa essencial dessa adaptação foi a obtenção dos coeficientes de correção atmosférica no topo da atmosfera para as diferentes bandas espectrais do sensor OLI do Landsat-9, fundamentais para o cálculo do albedo.

Os resultados obtidos poderão fornecer critérios relevantes para a melhoria do desempenho da irrigação nessa região. Além disso, o sucesso da aplicação local poderá viabilizar a replicação da metodologia em outros ambientes

semiáridos ao redor do mundo, exigindo, possivelmente, apenas ajustes nos coeficientes de regressão utilizados nas equações de modelagem.

4 MATERIAL E MÉTODOS

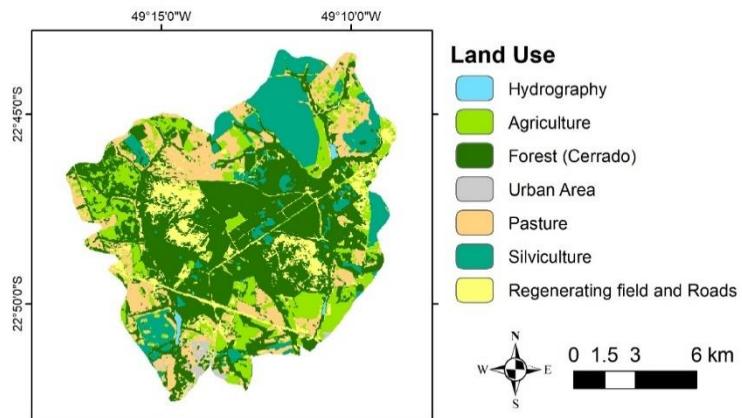
A área de estudo, apresentada na Figura 1, pertence à unidade hidrográfica do Rio Pardo, que integra a bacia do Rio Paranapanema, na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 17 — Médio Paranapanema (UGRHI 17 - MP). O local é delimitado a leste pelo Rio Capão Rico e a oeste pelo Rio Capivari.

O uso do solo na área de estudo desta pesquisa (com base no DOY 75/2017), também apresentado na Figura 1, é diversificado: vegetação natural (bioma Cerrado) — 67 km²; silvicultura (eucalipto) — 22 km²; cultura de cana-de-açúcar — 25 km²; área urbana — 2 km²; campos de regeneração — 5 km²; estradas — 0,4 km²; e pastagens — 40 km² (Silva; Manzione; Albuquerque Filho, 2019).

A região norte da área de estudo é amplamente ocupada por silvicultura. A região oeste é destinada à agricultura (cana-de-açúcar), enquanto a região sul apresenta áreas urbanas. As áreas de pastagem e floresta concentram-se nas porções central e leste da área de estudo (Silva; Manzione; Albuquerque Filho, 2018).

A estação agrometeorológica situada nessa área possui uma superfície de referência com albedo de 0,23 e índice de área foliar (LAI) de 2,88 (Manzione, 2019).

Figura 1. Uso da terra na área de estudo

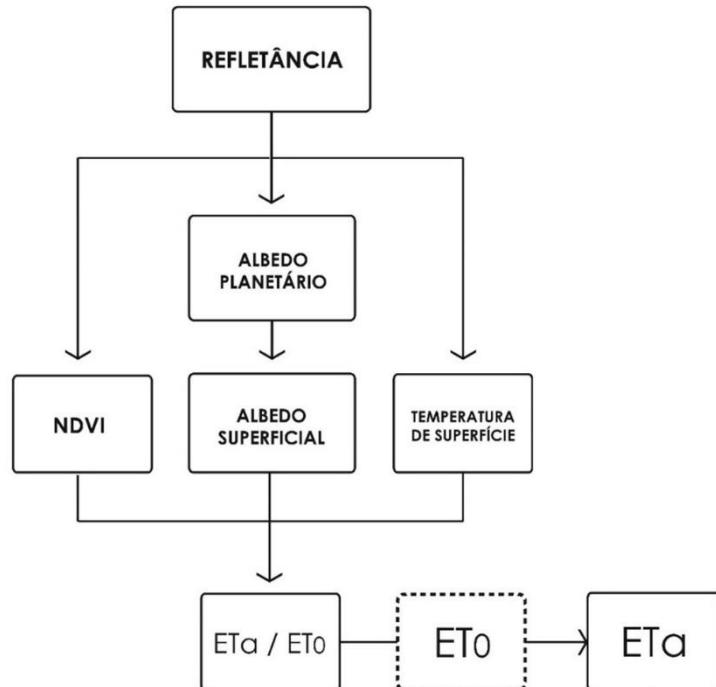


Fonte: Silva, Manzione e Albuquerque Filho (2019)

As bandas 1 a 7 do satélite Landsat 9 (com resolução espacial de 30 m) foram utilizadas para o cálculo do albedo de superfície (α_0) e do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), enquanto a temperatura da superfície (T_0) foi estimada por meio das bandas termais 10 e 11. A Figura 2 apresenta as etapas do cálculo do

modelo SAFER, nas quais as caixas com linhas contínuas representam as variáveis espacializadas obtidas por sensoriamento remoto, e as caixas tracejadas indicam os dados de entrada provenientes da estação agrometeorológica. Nesta figura, ET_0 refere-se à evapotranspiração de referência e ET_A , à evapotranspiração real.

Figura 2. Fluxograma para calcular a evapotranspiração real (ET_A) e fração evapotranspirativa (ET_A/ET_0) pelo modelo SAFER



Fonte: Silva, Teixeira e Manzione (2019)

Todos os coeficientes de regressão necessários para a aplicação do algoritmo SAFER, conforme descrito na Figura 2, foram previamente determinados e analisados estatisticamente no semiárido brasileiro, com base em medições simultâneas de campo e imagens Landsat, realizadas em agroecossistemas fortemente contrastantes ao longo de vários anos. Os dados de campo utilizados na calibração e validação do modelo envolveram culturas irrigadas esparsas e vegetação natural típica do semiárido (Caatinga), no período de 2001 a 2007. Além disso, os valores de ET_A/ET_0 sob condições ótimas de umidade da zona radicular, no presente estudo com limoeiros, foram confrontados com os coeficientes de cultura (K_c) disponíveis na literatura. Dessa forma, com base nessas calibrações, validações e pressupostos específicos para ambientes semiáridos, é possível esperar precisão suficiente na estimativa do balanço de energia, bem como em avaliações de desempenho da irrigação nas condições da área de estudo.

Segundo a Figura 2, as radiâncias espectrais (L_b) das bandas (b) 1 a 7, foram calculadas a partir de seus números digitais (DN_b):

$$L_b = a + bDN_b \quad (1)$$

Onde L_b está em $W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ \mu m^{-1}$, e a e b são coeficientes de regressão dados no arquivo de metadados.

A refletância para cada banda de satélite Landsat (ref_b) foi calculada como:

$$ref_b = \frac{L_b \pi d^2}{R_{ab} \cos \varphi} \quad (2)$$

Onde d é a distância relativa Terra-Sol; R_{ab} é a irradiância solar média no topo da irradiância atmosférica para cada banda ($W\ m^{-2}\ \mu m^{-1}$) e φ é o ângulo do zênite solar.

O albedo planetário de banda larga (α_p) foi calculado como a soma total dos valores de refletância (ref) para cada banda 1 a 7 (ref_b), de acordo com os pesos para cada banda (w_{banda}):

$$\alpha_p = \sum_{b=1}^{b=7} w_{banda} ref_b \quad (3)$$

A obtenção de valores adequados de w_{banda} para o satélite Landsat-9 é essencial para a correta aplicação do algoritmo SAFER, uma vez que essa corresponde a uma das etapas iniciais do procedimento. Por isso, dedicar atenção especial a essa fase constitui uma etapa fundamental para a consolidação e difusão do algoritmo SAFER em novos estudos. Para a estimativa do albedo de superfície (α_0), foram aplicadas correções atmosféricas aos valores de albedo no topo da atmosfera (α_p), com base em regressões realizadas a partir de medições anteriores de campo e de imagens Landsat. Essas medições incluíram culturas irrigadas e vegetação natural sob diferentes condições climáticas no semiárido brasileiro. O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) foi calculado a partir das refletâncias das bandas 4 (ref_4) e 5 (ref_5), conforme a equação:

$$NDVI = \frac{ref_5 - ref_4}{ref_5 + ref_4} \quad (4)$$

A razão de evapotranspiração, ou seja, a razão entre a evapotranspiração real (ET_A) e a evapotranspiração de referência (ET_0), é estimada em:

$$\frac{ET_A}{ET_0} = exp \left[a_{sf} + b_{sf} \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right], \quad (5)$$

Onde a_{sf} e b_{sf} são coeficientes de regressão, sendo respectivamente 1,8 e -0,008 para a condição semiárida brasileira, resultantes de medidas simultâneas de campo e sensoriamento remoto de ET_A e ET_0 , e α_0 , T_0 e NDVI, respectivamente.

Os valores diários de evapotranspiração de referência (ET_0), calculados a partir de dados meteorológicos, foram então multiplicados pelos valores de ET_A/ET_0 obtidos nas passagens do satélite, resultando nos valores diários de evapotranspiração real (ET_A) em larga escala. Segundo Allen *et al.* (1998), a razão ET_A/ET_0 pode ser considerada aproximadamente constante ao longo do dia.

Para obter valores coerentes de w_{banda} (Eq. 3) aplicáveis ao algoritmo SAFER em diferentes tipos de uso da terra, foi conduzido um estudo de otimização com base nos valores previamente aplicados ao Landsat-8 e ao Sentinel-2 (Silva; Teixeira; Manzione, 2019). O procedimento consistiu na variação incremental dos valores de w_{banda} em 0,01 (positiva ou negativamente), alterando-se uma banda por vez. A avaliação do desempenho estatístico da estimativa de evapotranspiração por meio do algoritmo SAFER foi realizada com base na correlação entre os dados estimados por sensoriamento remoto e os obtidos por métodos de referência, como o da FAO 56 (Allen *et al.*,

1998) e o da Embrapa Hortaliças (Marouelli; Silva; Silva, 2008). Utilizou-se uma análise de regressão linear, considerando o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o índice de Willmott (d). O índice de ajustamento d de Willmott, que varia de 0 a 1, representa o grau de concordância entre os valores estimados e os valores observados, funcionando como uma medida da capacidade do modelo em estimar a dispersão dos dados em relação à média observada (Willmott *et al.*, 1985).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta a relação dos pesos para correção atmosférica no topo da atmosfera (w_{banda}) que proporcionaram os melhores resultados ao final do processo de aplicação do SAFER. Verificou-se que, em comparação com os coeficientes aplicados no Landsat-8 e Sentinel-2, os valores das bandas 1 e 3 diminuíram 0,01, enquanto os das bandas 2 e 4 aumentaram na mesma proporção.

Tabela 1. Pesos para correção atmosférica no topo da atmosfera (w_{banda}) para as diferentes bandas espectrais dos sensores Landsat-9 OLI.

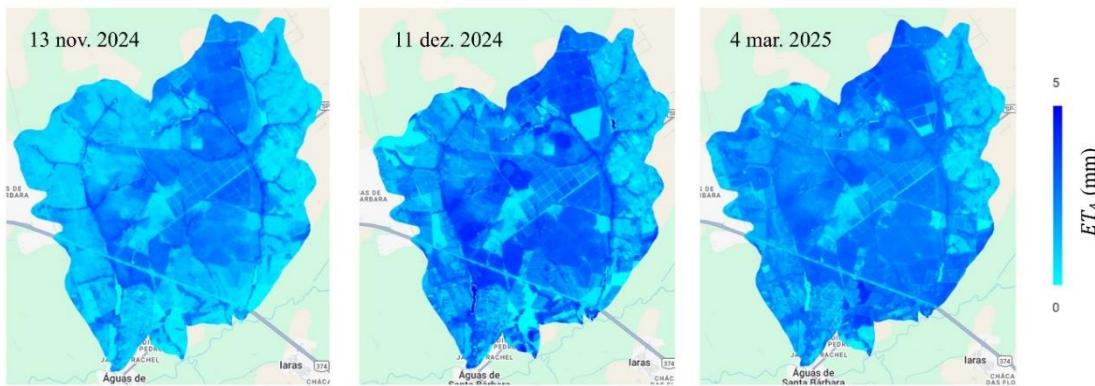
Sensor	Banda	w_{banda}
Landsat-9 OLI	1	0,11
	2	0,30
	3	0,31
	4	0,12
	5	0,08
	6	0,05
	7	0,04

Fonte: Os autores (2024).

Na Figura 3, apresentam-se os mapas de ET_A para a área de estudo nas datas de 13 de novembro e 11 de dezembro de 2024, e 4 de março de 2025. A primeira data apresentou valores mais baixos de ET_A (de 0,5 a 2,75 mm), devido a uma semana mais seca, com 25 dias consecutivos sem chuva. Já a segunda data apresentou valores de ET_A

mais altos, consequência da maior disponibilidade hídrica no solo, assim como o terceiro dia amostrado, que ocorreram após 2 e 4 dias sem chuva, respectivamente. Um dos benefícios do uso do SAFER é a sensibilidade do modelo à disponibilidade de água no solo, implícita em sua formulação (Silva; Teixeira; Manzione, 2019).

Figura 3. Mapas de ET_A pelo modelo SAFER obtidas a partir de imagens corrigidas com os valores considerados ótimos para correção atmosférica no contexto da modelagem de evapotranspiração

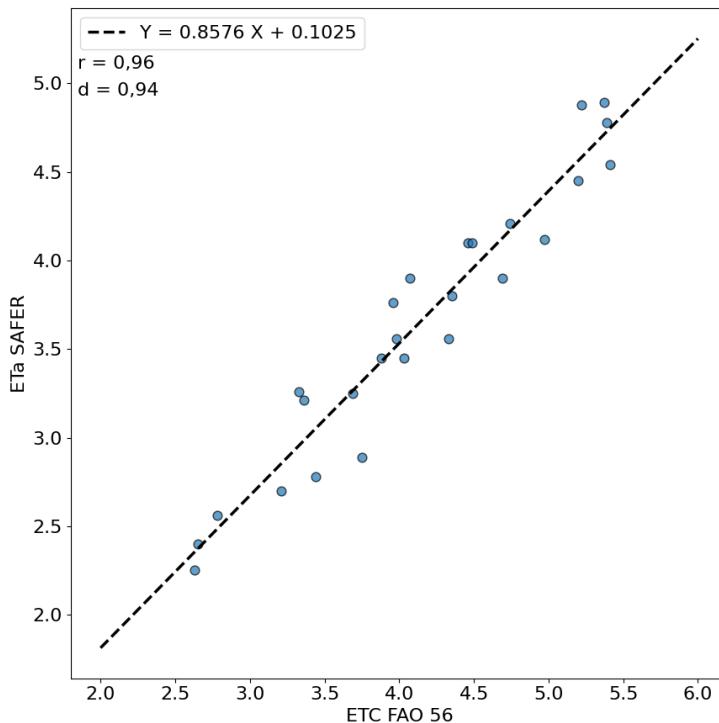


Fonte: Os autores (2024).

Para o comparativo da ET_c estimada pelo método padrão FAO 56, a curva de regressão que melhor se ajustou aos dados

(Figura 4) foi a linear, apresentando um coeficiente de correlação de Pearson de 0,96 e um índice de Willmott de 0,94.

Figura 4. Comparativo entre a ET_c estimado pelo método padrão FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) e a ET_A do método SAFER

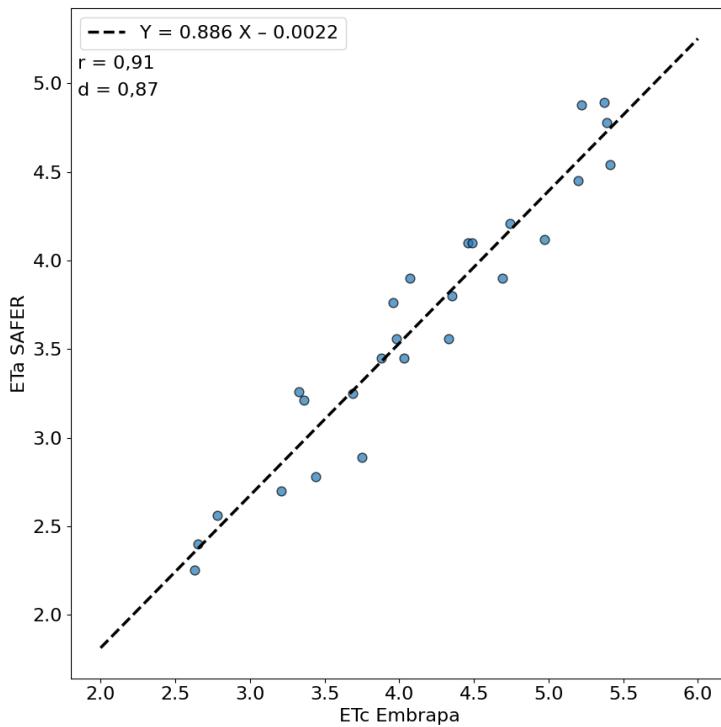


Fonte: Os autores (2024).

Já na comparação com o método de estimativa de ET_c da publicação da Embrapa (Figura 5), o índice de Willmott d apresentou valor de 0,87, enquanto o coeficiente de

correlação de Pearson r foi 0,91. Esses resultados indicam um bom ajuste entre os métodos e evidenciam uma forte correlação entre as variáveis analisadas.

Figura 5. Comparativo entre a ETc estimado pelo método padrão Embrapa (Marouelli; Silva; Silva, 2008) e a ET_A do método SAFER

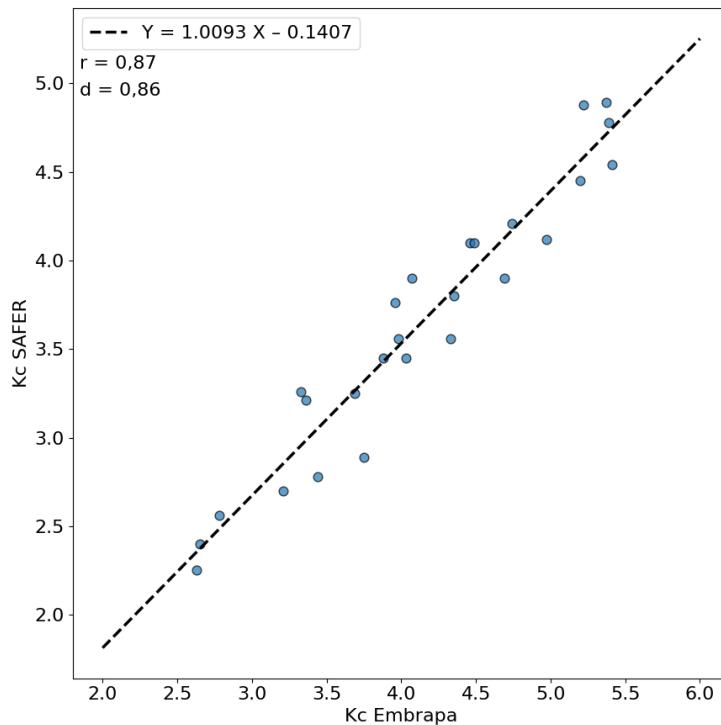


Fonte: Os autores (2024).

Na comparação com o coeficiente de cultura (K_c) (Figura 6), o índice de Willmott d apresentou valor de 0,86, e o coeficiente de correlação de Pearson r foi 0,87, indicando

um ajuste satisfatório, considerando a independência das variáveis de entrada dos métodos comparados.

Figura 6. Comparativo entre Kc estimado pelo método padrão FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) e a fração evapotranspirativa do método SAFER



Fonte: Os autores (2024).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que a adaptação dos coeficientes para correção atmosférica no topo da atmosfera, para as diferentes bandas espectrais dos sensores Landsat-9 OLI, etapa inicial para a aplicação do algoritmo SAFER, foi satisfatória, uma vez que os valores de ET_A e K_c estimados pelo SAFER apresentaram correlação significativa com os métodos da FAO e da Embrapa, mantendo coerência com valores plausíveis e aplicáveis ao gerenciamento da irrigação.

7 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 133, n. 4, p. 395-406, 2007a.

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**, Reston, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007b.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. (Irrigation and Drainage, n. 56).

- ALLEN, R. Quality assessment of weather data and micrometeorological flux-impacts on evapotranspiration calculation. **Journal of Agricultural Meteorology**, Tóquio, v. 64, n. 4, p. 191-204, 2008.
- ALLEN, R.; IRMAK, A.; TRESSA, R.; HENDRICKX, J. M. H.; BASTIAANSSEN, W.; KJAERSGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 25, n. 26, p. 4011-4027, 2011.
- CONRAD, C.; DECH, S. W.; HAFEEZ, M.; LAMERS, J.; MARTIUS, C.; STRUNZ, G. Mapping and assessing water use in a Central Asian irrigation system by utilizing MODIS remote sensing products. **Irrigation and Drainage Systems**, Berlim, v. 21, n. 3/4, p. 197-218, 2007.
- FOOLAD, F.; BLANKENAU, P.; KILIC, A.; ALLEN, R. G.; HUNTINGTON, J. L.; ERICKSON, T. A.; OZTURK, D.; MORTON, C. G.; ORTEGA, S.; RATCLIFFE, I.; FRANZ, T. E.; THAU, D.; MOORE, R.; GORELICK, N.; KAMBLE, B.; REVELLE, P.; TREZZA, R.; ZHAO, W.; ROBISON, C. W. Comparison of the Automatically Calibrated Google Evapotranspiration Application—EEFlux and the Manually Calibrated METRIC Application. **Preprints**, Basel, v. 1, n. 40, p. 2018070040, 2018.
- HARGREAVES, G. H.; ALLEN, R. G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 129, n. 1, p. 53-63, 2003.
- MANZIONE, R. L. **Análise de séries temporais e mapeamento de características das águas subterrâneas a partir de dados de monitoramento**. São Paulo: Instituto Água Sustentável, 2019.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. **Irrigação por aspersão em hortaliças: qualidade de água, aspectos do sistema e método prático de manejo**. 2. ed. rev., atual. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2008.
- SILVA, C. O. F.; MANZIONE, R. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Large-scale spatial modeling of crop coefficient and biomass production in agroecosystems in Southeast Brazil. **Horticulturae**, Basel, v. 4, n. 4, p. 44, 2018.
- SILVA, C. O. F.; TEIXEIRA, A. H. C.; MANZIONE, R. L. agriwater: An R package for spatial modelling of energy balance and actual evapotranspiration using satellite images and agrometeorological data. **Environmental Modelling & Software**, Amsterdã, v. 120, p. 104497, 2019.
- TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; BOLFE, E. L. Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots with corn crop in the São Paulo State, Brazil. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, 2014, Cardiff. **Proceedings** [...]. Cardiff: SPIE, 2014. v. 9239, p. 923900-1-923900-10.
- 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 the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, DC, v. 90, p. 8995-9005, 1985.