

# Estimativa de evapotranspiração real em Bacias Hidrográficas do Cerrado brasileiro

Actual evapotranspiration estimate in  
watersheds in brazilian savana

Estimation de l'évapotranspiration réelle  
dans des bassins hydrographiques du  
savane brésilien



Alécio Perini Martins

Universidade Federal de Jataí – Jataí – Goiás – Brasil

[alecioperini@ufj.edu.br](mailto:alecioperini@ufj.edu.br)



Emerson Galvani

Universidade de São Paulo – São Paulo – Brasil

[egalvani@usp.br](mailto:egalvani@usp.br)

**Resumo:** A evapotranspiração é o fenômeno responsável por definir a transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera. Pode ser estimada a partir de imagens obtidas por técnicas de sensoriamento remoto, permitindo o planejamento de uso adequado da água, além de contribuir com estudos sobre mudanças ambientais. A pesquisa tem como objetivo a aplicação do modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms of Land*) para estimativa de evapotranspiração real a partir de parâmetros biofísicos mensurados por sensoriamento remoto e geoprocessamento em diferentes bacias hidrográficas. Após a implementação do SEBAL em 38 cenas Landsat8 no período entre maio de 2018 e setembro de 2019, constatou-se índice de desempenho muito bom para dados diários e sazonais, enquanto que para a evapotranspiração instantânea o modelo ainda requer ajustes. Os valores diários de referência (ET<sub>o</sub>) variaram de 1,97 mm no inverno a 8,16 mm no verão, enquanto os valores de evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) variaram de 3,68 mm no inverno a 7,08 mm na primavera, com a ET<sub>r</sub> apresentando-se 33% inferior aos valores de

referência. Considerando a precipitação, a ETr corresponde a 74% do valor anual e indica que o modelo é capaz de estimar estes valores em escala de 1:150.000 com erros inferiores a 15%.

**Palavras-chave:** Modelagem ambiental. Geotecnologias. SEBAL. Uso da Terra.

**Abstract:** The evapotranspiration is the phenomenon responsible for defining the transference of water from the soil-plant system to the atmosphere. It can be estimated through images obtained through remote sensing techniques, allowing the planning of proper water use, besides contributing to studies regarding environmental changes. The research has as objective to apply the SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms of Land) model to estimate the actual evapotranspiration from biophysical parameters measured by remote sensing and geoprocessing in different watersheds. After the implementation of SEBAL in 38 Landsat8 scenes from May 2018 to September 2019, a very good performance index was observed for daily and seasonal data, whereas for the instantaneous evapotranspiration the model still demands adjustments. The daily reference values (ET<sub>o</sub>) varied from 1.97 mm in winter to 8.16 mm in summer, while the actual evapotranspiration values (ETr) varied from 3.68 mm in winter to 7.08 mm in spring, with the ETr presenting itself 33% inferior to the reference values. Considering the rainfall, the ETr corresponds to 74% of the annual value and indicates that the model is able to estimate these values in scale of 1:150.000 with inferior errors to 15%.

**Keywords:** Environmental Modeling. Geotechnologies. SEBAL. Land Use.

**Résumé:** L'évapotranspiration est le phénomène responsable pour le transfert de l'eau du système sol-plante pour l'atmosphère. Elle peut être estimée à partir d'images obtenues par des techniques de télédétection, ce qui permet la planification de l'utilisation appropriée de l'eau autre sa contribution aux études sur les changements environnementaux. L'objectif de la recherche est l'application du modèle SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms of Land*) pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle à partir de paramètres biophysiques mesurés par télédétection et géotraitement dans des différents bassins hydrographiques. Après l'implémentation du SEBAL en 38 scènes Landsat8 dans la période entre mai 2018 et septembre 2019, un indice très bon pour des données journaliers et saisonniers a été constaté, alors que pour l'évapotranspiration instantanée le modèle demande encore

oscillé de 1,97 mm en hiver a 8,16 mm en été alors que les valeurs de l`évapotranspiration réelle (ETr) ont oscillé entre 3,68 mm en hiver et 7,08 mm au printemps, avec l`ETr se présentant 33% inférieure aux valeurs de référence. Considérant la précipitation, l`ETr correspond à 74% de la valeur annuelle et indique que le modèle est capable de estimer ces valeurs dans une échelle de 1:150.000 avec des erreurs inférieurs à 15%.

**Mots clés:** Modélisation environnementale. Géotechnologies. SEBAL. Occupation des Sols.

## Introdução

Componente fundamental do ciclo da água no ambiente, a evapotranspiração é um termo coletivo que inclui a evaporação da umidade presente em superfícies vivas (transpiração) e a evaporação dos corpos d'água e do solo, sendo usado para descrever a perda de água da superfície da Terra para a atmosfera (LIOU e KAR, 2014). Entre os principais condicionantes deste processo estão a energia solar, as características de uso e cobertura da terra e a demanda atmosférica, controlada pelo poder evaporante do ar (PEREIRA, SEDIYAMA e VILLA NOVA, 2013).

Em áreas savânicas, marcadas pela forte sazonalidade e com chuvas concentradas entre outubro e abril, como é o caso do Cerrado Brasileiro, estes elementos merecem atenção, considerando que o período seco prolongado aumenta a demanda atmosférica e produz cenários com baixa umidade relativa do ar. Além disso, os intensos processos de mudança de uso e cobertura da terra tendem a criar um ambiente ainda mais seco, sobretudo pela conversão da vegetação natural em zonas de produção agropecuária.

Conforme Klink e Machado (2005), apesar da elevada biodiversidade, apenas 2,2% do Cerrado encontrava-se protegido em unidades de proteção integral. As unidades de uso sustentável correspondiam a 1,9%, enquanto terras indígenas ocupavam 4,1% do bioma.

De acordo com dados do PRODES/INPE (2019), entre os anos de 2001 e 2019, todos os estados localizados na área de domínio dos Cerrados apresentaram reduções progressivas de áreas desmatadas, chegando a 6.500 km<sup>2</sup> de perda de área vegetada em 2019, enquanto em 2004 esse valor foi de quase 30.000 km<sup>2</sup>. Os estados que apresentaram maiores valores absolutos de desmatamento no período foram Mato Grosso, Goiás e Minas Gerais. Para se ter uma ideia da gravidade do tema, enquanto a Amazônia apresentou um desmatamento bruto de aproximadamente 74.125 km<sup>2</sup> entre os anos de 2008 e 2019, a área de Cerrado desmatada foi de 115.132 km<sup>2</sup>. Estas informações sobre desmatamento no Cerrado alertam para o risco da escassez hídrica. As mudanças no uso e ocupação das terras alteram o albedo e a temperatura de superfície, que interferem diretamente no balanço de radiação e na evapotranspiração e, por consequência, no ciclo da água.

Silva e Ferreira Júnior (2010), ao analisarem o cenário de Goiás



entre os anos de 2003 e 2007, indicaram uma taxa de desmatamento de 1,1%, com maior concentração nas regiões Norte, Nordeste e Noroeste. Estes valores indicam um avanço da fronteira agrícola em direção aos estados de Mato Grosso, Tocantins e Bahia. O monitoramento disponibilizado pelo PRODES/INPE aponta que o desmatamento em Goiás entre os anos de 2001 e 2019 atingiu 45.137,03 km<sup>2</sup>, o que equivale a 13,3% do território Estadual.

A partir do final da década de 1990, pesquisadores têm se dedicado a desenvolver modelos e técnicas para mensurar e estimar eventos que alteram as características ambientais naturais e, conseqüentemente, o clima do planeta. Estes modelos também prospectam cenários futuros e permitem a elaboração de planos para minimizar, conter e/ou sanar os impactos causados pelas atividades humanas. Entre estes modelos está o *Surface Energy Balance Algorithms of Land* (SEBAL), proposto por Bastiaanssen (1995) e desenvolvido especificamente para estudar os fluxos de calor no solo, e estimar a evapotranspiração em regiões para as quais não se dispõe de dados meteorológicos consistentes. O SEBAL vem sendo utilizado por vários pesquisadores em diversos agroecossistemas, destacando os estudos de Bastiaanssen (1995; 2000), Bastiaanssen et al (1998), Allen et al. (2002), Hemakumara et al (2003), Tasumi et al (2005), Bezerra (2006), Kimura et al (2007), Nicácio (2008), Sun et al. (2011), Ruhoff (2011), Martins (2015), entre outros.

Liou e Kar (2014), indicam que a maior vantagem do SEBAL está na pouca dependência sobre dados de superfície e calibração interna automática. Ainda segundo os autores, o SEBAL foi testado sob várias condições climáticas, com precisão em escala de campo de 85% e 95% nas escalas diária e sazonal. Bastiaanssen (2000), ao comparar estimativas do SEBAL com medições de campo, apontou um erro relativo na fração evaporativa de 20% na escala de 1:100.000 e 10% na escala de 1:500.000.

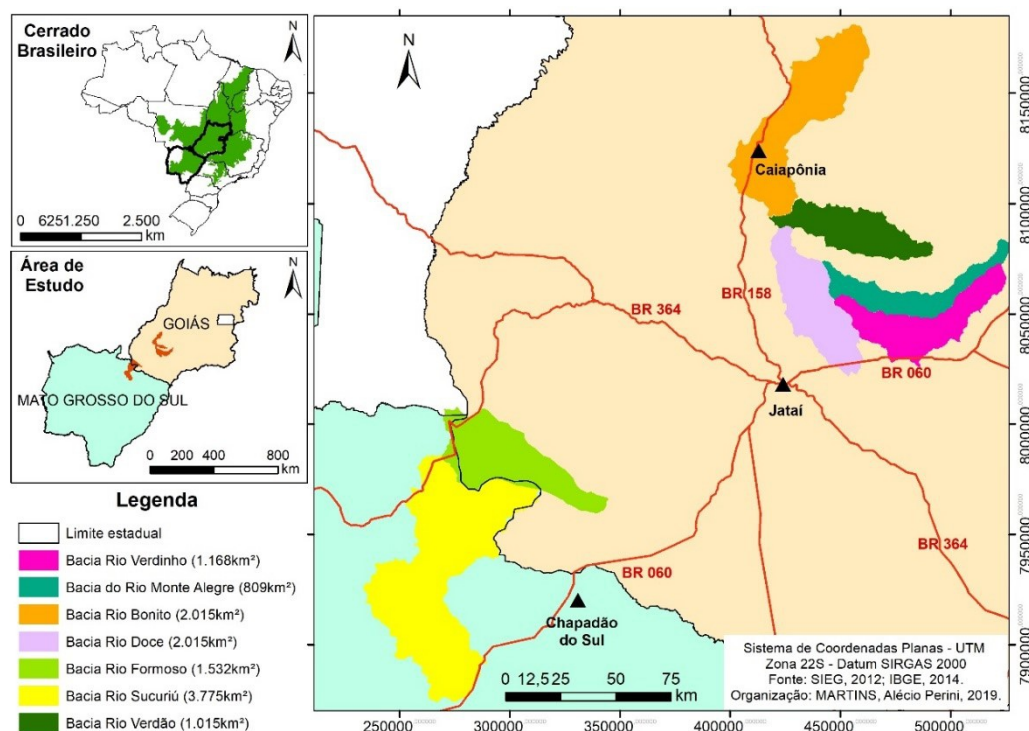
Considerando as especificidades climáticas e o processo de ocupação do Cerrado, bem como a necessidade de adaptação de metodologias de estudo com poucos dados coletados em campo, a pesquisa tem como objetivo central a aplicação do modelo SEBAL para estimativa de evapotranspiração real a partir de parâmetros biofísicos mensurados por sensoriamento remoto e geoprocessamento, estabelecendo relações com o uso e ocupação das terras em diferentes bacias hidrográficas do Cerrado Brasileiro.

## Procedimentos

### Bases de dados e estatística

O estudo considerou áreas representativas do Cerrado Brasileiro, com diversidade de ambientes naturais e antrópicos e características climáticas similares. Foram selecionadas sete bacias hidrográficas ou parte de bacias (figura 01), sendo elas: a) Bacia do Rio Formoso, no extremo sudoeste do estado de Goiás; b) alto curso da Bacia do Rio Sucuriú, na região nordeste de Mato Grosso do Sul; c) Alto e médio cursos das bacias dos rios Doce, Monte Alegre, Verdão e Verdinho, entre os municípios de Jataí, Rio Verde e Montividiu no Sudoeste de Goiás; d) Bacia do Rio Bonito, nos municípios de Caiapônia, Palestina de Goiás e Arenópolis.

Figura 01 – Localização da área de estudo.



Organização: Dos autores, 2019.

Inicialmente, foram identificadas três estações meteorológicas do INMET na região, em ambientes com características que representam a área de estudo: Jataí (GO),

Caiapônia (GO) e Chapadão do Sul (MS). As informações necessárias para calibração do modelo são: Temperatura do ar média, máxima e mínima (°C); Umidade relativa do ar máxima e mínima (%); Pressão atmosférica (hPa); Velocidade dos Ventos (m/s); Precipitação (mm) e Radiação solar global (W/m<sup>2</sup>). Organizou-se os dados para o ano hidrológico de 01/10/2018 a 30/09/2019. Os dados de precipitação mensal foram obtidos junto aos postos pluviométricos da Agência Nacional de Águas localizados nos municípios de Jataí, Rio Verde, Montividiu, Caiapônia, Arenópolis, Serranópolis, Aporé e Chapadão do Céu (em Goiás), e Chapadão do Sul, Cassilândia e Costa Rica (em Mato Grosso do Sul).

O banco de imagens foi composto por imagens de satélite Landsat 8 (sensores OLI e TIRS) e de radar (SRTM), todas com resolução espacial de 30 m e obtidas gratuitamente mediante cadastro na página do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS - <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Foram selecionadas 38 imagens Landsat8 com cobertura de nuvens inferior a 10% das órbitas/ponto 223/72, 223/73, 224/72 e 224/73 para os dias 22/05/2018, 30/06/2018, 25/07/2018, 10/08/2018, 11/09/2018, 27/09/2018, 16/12/2018, 08/01/2019, 02/02/2019, 06/03/2019, 29/03/2019, 09/05/2019, 16/05/2019, 01/06/2019, 26/06/2019, 12/07/2019, 19/07/2019, 28/07/2019 e 05/09/2019.

Inicialmente, procedeu-se com a correção radiométrica de cada banda, conforme procedimentos descritos por Ariza (2013). Considerando a resolução das imagens, a escala de trabalho adotada foi de 1:150.000, obtendo-se um erro de estimativa inferior a 15%, considerado adequado para a extensão da área.

Para validação das estimativas, calculou-se os dados de Evapotranspiração de Referência Padrão FAO pela equação de Penman-Monteith (ALLEN et. al., 1998). Todos as etapas da pesquisa foram desenvolvidas no software ArcGIS 10.6.1®, licenciado para o Laboratório de Geoinformação da UFG/Regional Jataí, utilizando principalmente a Calculadora Raster, onde cada equação foi inserida e processada sobre os produtos de Sensoriamento Remoto.

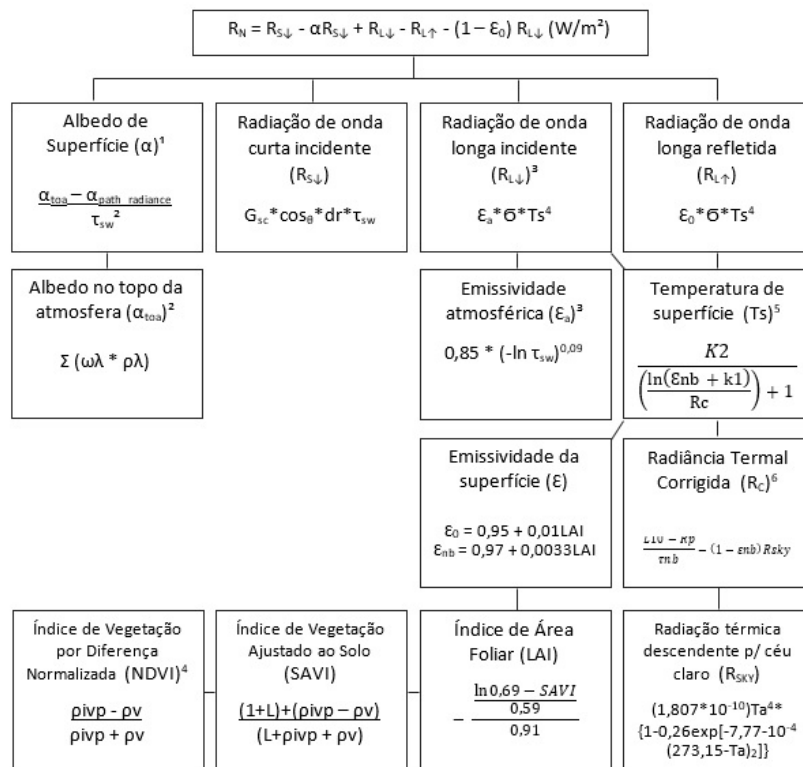
Todas as variáveis receberam análise estatística descritiva, com geração de médias e identificação de valores máximos, mínimos, desvios padrão e variância. Em um segundo momento, identificou-se a correlação (R) existente entre as variáveis (Correlação de Pearson), sendo que para aquelas que apresentaram valores superiores a 0,7 (correlação forte), foram

calculadas as equações de regressão, coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro médio, o erro quadrático, além da realização de testes de desempenho pelos coeficientes D de Willmott et. al. (1985) e C de Camargo e Sentelhas (1997). Ambos apresentam uma escala de desempenho que varia de péssimo a ótimo, conforme Oliveira (2016): Péssimo < 0,40; Mau 0,40 a 0,50; Sofrível 0,50 a 0,60; Mediano 0,60 a 0,65; Bom 0,65 a 0,70; Muito bom 0,75 a 0,85; e Ótimo > 0,85.

### Balanco de radiação, fluxos de calor e evapotranspiração

Para calcular o balanço de radiação em superfície, esquematizado na figura 02, é necessário estimar cinco parâmetros biofísicos, principalmente o albedo de superfície, um importante indicador de mudanças ambientais. Em larga escala, mudanças no albedo podem resultar em modificações no clima local, como diminuição na umidade relativa do ar e alterações na ocorrência de chuvas convectivas.

Figura 02 - Organograma do cálculo do saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ).



<sup>1</sup> à variável α<sub>path radiance</sub> atribui-se um valor de 0,03 conforme Bastiaanssen (2000); <sup>2</sup> a variável ρλ resulta da equação 6 e ωλ corresponde a um coeficiente de peso para cada banda

(ALLEN et. al, 2002), obtido pela divisão do valor de ESUN de cada banda pelo somatório de ESUN para todas as bandas. Neste estudo, os valores obtidos para  $\omega\lambda$  foi de 0,300, 0,276, 0,233, 0,143, 0,035 e 0,012 para as bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 respectivamente; <sup>3</sup>  $\sigma$  é constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ ); <sup>4</sup>  $\rho_v$  e  $\rho_{ivp}$  correspondem, respectivamente, às reflectâncias nas bandas do vermelho e infravermelho próximo; <sup>5</sup>  $k_1$  e  $k_2$  são constantes encontradas nos metadados da imagem de satélite; <sup>6</sup>  $R_p$  e  $\tau_{nb}$  correspondem ao brilho e à transmissividade da banda 10, respectivamente).  $\ln$  corresponde ao logaritmo neperiano.

Adaptado de: Allen et al (2002).  
Organização: Dos autores, 2019.

Após a realização do balanço de radiação, é possível estimar o fluxo de calor no solo (G) considerado como a taxa de armazenamento de calor no solo e vegetação devido ao fenômeno da condução. O valor de G pode ser calculado pela equação 1, desenvolvida por Bastiaanssen (2000) e descrita por Allen et al (2002).

$$G = [Ts/\alpha(0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1-0,98NDV^4)]Rn \quad (1)$$

Onde  $T_s$  é a temperatura de superfície (em graus Celsius);  $\alpha$  o albedo de superfície; NDVI o índice de vegetação;  $R_n$  o saldo de radiação à superfície.

O fluxo de calor sensível (H) é a taxa de perda de calor para o ar por convecção e condução, impulsionada por uma diferença de temperatura, calculado de acordo com a equação 2, descrita por Allen et al (2002):

$$H = \frac{\rho * c_p * dT}{r_{ah}} \quad (2)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do ar ( $\pm 1,07 \text{ kg/m}^3$ );  $c_p$  é o calor específico do ar ( $1004 \text{ J/kg}^{-1}/\text{K}$ );  $dT$  (K) é a diferença da temperatura entre duas alturas; e  $r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica para transporte de calor (m/s).

Allen et al (2002) destacam que essa é uma equação de difícil



solução por apresentar duas incógnitas, representadas por  $rah$  e  $dT$ , sendo necessária a adoção de “pixels âncora”. O processo de obtenção dos valores de  $H$  encontra-se esquematizado na figura 03.

Com os valores do saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ), fluxo de calor no solo ( $G$ ) e fluxo de calor sensível ( $H$ ), torna-se possível calcular o fluxo de calor latente, também medido em  $W/m^2$  (equação 3) e, conseqüentemente, os valores para evapotranspiração horária, diária, mensal e sazonal. Entende-se como fluxo de calor latente a emissão de calor latente a partir da superfície ocasionado pela evapotranspiração.

$$\lambda ET = R_n - G - H$$

(3)

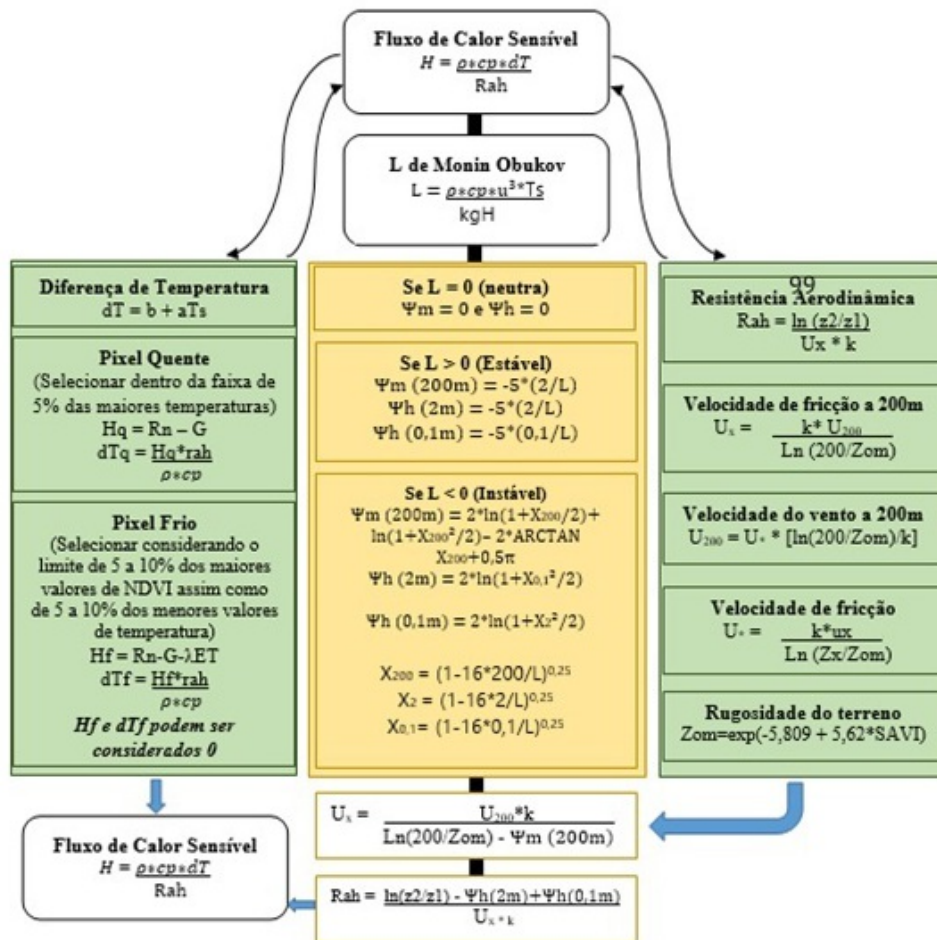
Para o cálculo da Evapotranspiração de Referência, utilizou-se a equação de Penman –Monteith descrita por Allen et. al. (1998) no *FAO Irrigation and drainage paper 56* (equação 4).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

(4)

Onde  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência (mm/dia);  $\Delta$  a declividade da curva de pressão de vapor ( $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ );  $R_n$  o saldo de radiação ( $MJ/m^2/dia$ )  $G$  o fluxo de calor no solo ( $MJ/m^2/dia$ );  $\gamma$  a constante psicrométrica ( $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ );  $T$  a temperatura do ar a 2m ( $^\circ C$ );  $U_2$  a velocidade dos ventos a 2m (m/s);  $e_s$  a pressão do vapor saturado (kPa);  $e_a$  a pressão atual de vapor (kPa).

Figura 3 - Organograma do cálculo do fluxo de calor sensível (H)



Onde:  $\rho$  é a densidade do ar ( $\pm 1,07 \text{ kg/m}^3$ );  $cp$  é o calor específico do ar ( $1004 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ );  $dT$  (K) é a diferença da temperatura entre duas alturas; e  $rah$  é a resistência aerodinâmica para transporte de calor (m/s).  $U$  é a velocidade do vento a 2m medida na estação meteorológica;  $U_x$  é a velocidade de fricção do vento; e  $U_{200}$  é a velocidade dos ventos a uma altura hipotética de 200m;  $Zom$  corresponde à rugosidade do terreno e  $\Psi$  representa um fator de correção considerando atmosfera estável ou instável.

Adaptado de: Allen et al (2002). Organização: Dos autores, 2019.

A evapotranspiração real instantânea (horária) foi calculada pixel a pixel, considerando tanto condições ideais, quanto de saturação ou restrição hídrica, a partir do saldo de calor latente ( $\lambda ET$ ) e o calor latente de evaporação ( $\lambda$ ), conforme equações 5 e 6, descritas por Allen et. al. (2007).

$$ETH = 3600 \cdot \lambda ET / \lambda$$

(5)



Onde  $\lambda$  corresponde ao calor latente de evaporação (equação 27, dada em J/Kg e descrita por HARRISSON, 1963) e 3600 é o valor de conversão de segundos para horas (BASTIAANSSEN et al, 1998; NICÁCIO, 2008).

$$\lambda = [2,501 - 0,00236 * (T_s - 273,16)] * 10^6 \quad (6)$$

Para estimar a evapotranspiração diária (equação 7) e mensal/sazonal (equação 8), é necessário calcular os valores de referência ( $ET_o$ ) para 24 horas e para o período, além de um componente conhecido como Fração Evaporativa, que é definida como a razão entre a evapotranspiração instantânea ( $ET_h$ ) e a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ). De acordo com Allen et. al. (2002), os valores da fração evaporativa ( $ET_rF$ ) são semelhantes ao coeficiente da cultura ( $K_c$ ), variando de 0 a 1 e, ocasionalmente, atingindo valores superiores a 1 quando  $ET_h$  for significativamente superior à  $ET_o$ , como em corpos hídricos e áreas com vegetação arbórea muito densa.

$$ET_{24} = ET_{rF} * ET_{o24} \quad (7)$$

Onde  $ET_{o24}$  (mm/dia) é o acumulado de  $ET_o$  em 24 horas para o dia de obtenção da imagem, calculado a partir da soma dos valores de  $ET_o$  horários ao longo do dia.

$$ET_{periodo} = ET_{rF_{periodo}} * \sum_1^n ET_{o24} \quad (8)$$

## Resultados e discussão

Constatou-se que as maiores correlações se deram entre: a)

Saldo de radiação estimado e saldo de radiação mensurado na estação do INMET; b) Saldo de radiação estimado e radiação solar global no topo da atmosfera; c) Evapotranspiração horária e Evapotranspiração de referência; d) Evapotranspiração diária e Evapotranspiração de referência; e) Evapotranspiração mensal e Evapotranspiração de referência; f) Temperatura do ar registrada na estação automática do INMET e Temperatura de Superfície.

Conforme informações expostas na tabela 01, considera-se que o processo de validação do modelo SEBAL apresentou resultados significativos, sobretudo para o saldo de radiação e para a evapotranspiração real diária e mensal. As menores correlações foram observadas entre a evapotranspiração horária e a evapotranspiração de referência e a temperatura do ar e a temperatura de superfície, atribuído ao tamanho da área imageada pelo pixel de 900m<sup>2</sup>, maior que a área das estações automáticas e convencionais do INMET. Estes pixels podem incluir informações de áreas cobertas por concreto ou asfalto do entorno.

Tabela 01 - Estatística de validação de parâmetros estimados e de referência no ano hidrológico 2018/2019.

Variáveis/unidades de medidas	R	R <sup>2</sup>	EQM	REQM	Índice D	Índice C
RN estimado e RN mensurado (INMET) (W/m <sup>2</sup> )	0,8851	0,7834	-5,0488	17,93	0,8913	0,7889
RN estimado e Radiação solar global no topo da atmosfera (W/m <sup>2</sup> )	0,9262	0,8578	-17,3080	77,22	0,6198	0,5740
Evapotranspiração horária e Evapotranspiração de referência (mm/h)	0,8647	0,7478	-0,0023	0,02	0,6246	0,4657
Evapotranspiração diária e Evapotranspiração de referência (mm/dia)	0,8641	0,7468	-0,0346	0,23	0,9651	0,8340
Evapotranspiração mensal e Evapotranspiração de referência (mm/mês)	0,8386	0,7033	-0,9109	8,04	0,8489	0,7119
Temperatura do ar (INMET) e Temperatura de Superfície (K)	0,7221	0,5214	0,1476	2,13	0,0291	0,0210

R = Correlação de Pearson; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinação; EQM = Erro quadrático médio; REQM = Raiz quadrada do EQM; Índice D = Índice de desempenho de Willmott; Índice C = Índice de desempenho de Camargo e Sentelhas.

Organização: Dos autores, 2019.

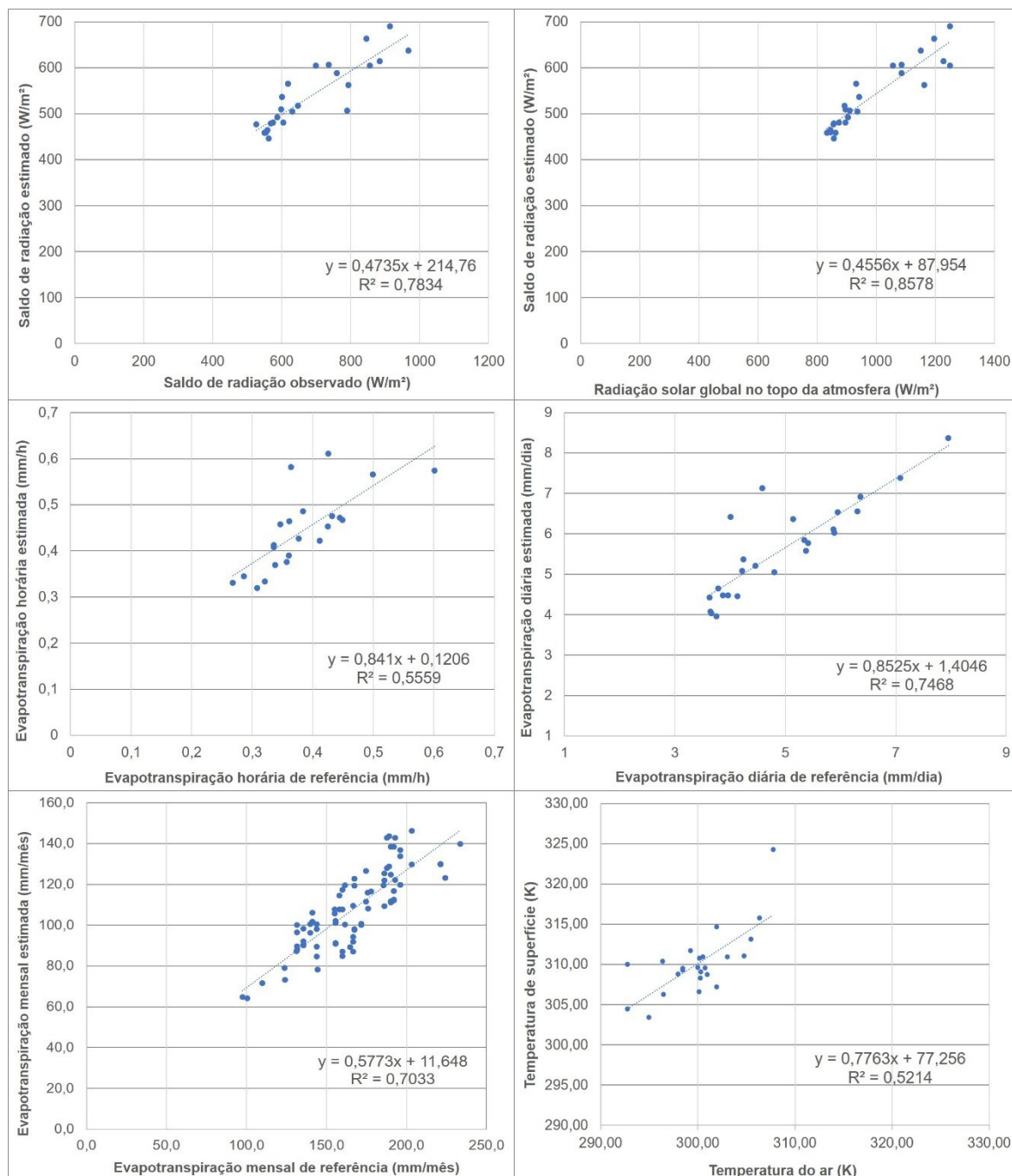
A correlação de Pearson é uma medida adimensional que assume valores entre -1 e 1, usada para quantificar o grau de relacionamento linear entre duas variáveis. Valores próximos a 1 indicam uma alta correlação linear positiva e, a -1 indicam alta correlação linear negativa. Já os valores próximos a 0 indicam que não há qualquer relação entre as variáveis. Embora seja importante para auxiliar na tomada de decisão, uma alta correlação não implica que exista boa concordância entre os resultados. Já o coeficiente de determinação descreve a qualidade do ajustamento obtido a partir do modelo de regressão linear, indicando como uma variável pode influenciar outras variáveis ou se uma variável pode mudar o comportamento de outra.

O coeficiente de determinação apresenta valores mais baixos do que os identificados pela correlação de Pearson e, novamente, observa-se que os valores mais baixos vão refletir a relação positiva entre  $ET_{rh}$  e  $ET_{oh}$  e entre  $T_a$  e  $T_s$ . A sequência de gráficos da figura 04 demonstram a relação entre as variáveis dispostas na tabela 01.

O desempenho do modelo foi aferido a partir de dois índices, conhecidos como Índice D de Willmott e Índice C de Camargo e Sentelhas. O Índice D relaciona-se ao afastamento dos valores preditos com relação aos observados (WILLMOTT et. al, 1985), enquanto que o Índice C reflete a confiança e/ou desempenho do método, considerando que este é obtido pela multiplicação do valor de correlação de Pearson pelo Índice D (CAMARGO e SENTELHAS, 1997).

Após a análise da correlação entre as variáveis, calculou-se o erro quadrático médio, assim como sua raiz, sendo este indicador importante para verificar a concordância entre as variáveis (WILLMOTT et. al., 1985). Quanto menor o EQM, maior a concordância entre as variáveis. Oliveira (2016) destaca que, em uma situação ideal, o EQM deve ser próximo a 0, identificado na comparação das variáveis estimadas e aferidas de  $ET_{rh}$  x  $ET_{oh}$ ,  $ET_{r24}$  x  $ET_{o24}$ ,  $ET_{rMensal}$  x  $ET_{oMensal}$  e  $T_a$  x  $T_s$ . Com exceção de  $T_a$  x  $T_s$ , todas as variáveis apresentaram EQM negativo, indicando que as estimativas foram subestimadas considerando os valores de referência. Os componentes do saldo de radiação foram os que apresentaram maiores erros, todos indicando subestimativa.

Figura 04 – Análise estatística de parâmetros estimados e de referência no ano hidrológico 2018/2019.



Organização: Dos autores, 2019.

Analisando o desempenho das variáveis expostas na tabela 01, a relação entre temperatura do ar e temperatura de superfície foi a única classificada como péssima, apesar da correlação alta, com valores próximos a 0. Isto indica que a Temperatura de

Superfície está ligada mais às características de uso e ocupação da terra e ao balanço de radiação do que a elementos atmosféricos, como ocorre com a Temperatura do Ar. Já as variáveis relacionadas ao saldo de radiação apresentaram desempenho Muito bom e Ótimo para a comparação com o Saldo de Radiação mensurado na Estação Automática do INMET e Mediano e Sofrível quando comparado à radiação solar global no topo da atmosfera, indicando que este último não é um bom parâmetro de determinação visto os efeitos das diversas camadas da atmosfera sobre a radiação solar.

Quando avaliado o desempenho do método para estimativa de evapotranspiração real, obteve-se um resultado ótimo para a estimativa de evapotranspiração diária, mas um resultado mediano/mau para a evapotranspiração horária, corroborando os apontamentos de Liou e Kar (2014) que indicaram uma maior precisão do modelo para escalas sazonais. Para a relação entre ETrMensal e EToMensal, o desempenho foi Muito Bom/Bom, considerando os índices D e C respectivamente. Estes resultados indicam que esta estimativa necessita de uma maior atenção, sobretudo no cálculo da ETo instantânea.

Sun et. al. (2011), ao estimarem a evapotranspiração no Lago Nansi, região úmida da China, indicaram que os valores instantâneos do SEBAL não são representativos da evapotranspiração anual, visto que a necessidade de água ou evapotranspiração das culturas é diferente para os vários estágios de crescimento das plantas. Estes resultados corroboram com os encontrados no Cerrado quando comparados o índice de desempenho da estimativa de evapotranspiração horária e os índices diários e mensais.

Considerando os valores diários de ETo24 e ETr24, percebe-se uma relação intrínseca com os períodos chuvoso (de outubro a abril) e seco (de maio a setembro) no Cerrado, sendo o maior valor de ETo24 registrado no dia 07/01/2019 (8,16mm) e o menor no dia 05/07/2019 (1,97mm). Entre os valores de ETr24 estimados para as datas das imagens de satélite, o maior valor foi registrado no dia 16/12/2018 (7,08mm) e o menor no dia 12/07/2019 (3,68mm). Para todas as localidades, a ETr24 estimada corresponde a 90% da ETo24, dentro da faixa de erro aceitável para o mapeamento que foi de 15% (Tabela 02).

Tabela 02 - Valores estimados e de referência do saldo de radiação, fluxos de calor e evapotranspiração para as estações meteorológicas de Jataí, Caiapônia e Chapadão do Sul.

		Radiação INMET (W/m <sup>2</sup> )	Radiação SEBAL (W/m <sup>2</sup> )	G (W/m <sup>2</sup> )	H (W/m <sup>2</sup> )	λET (W/m <sup>2</sup> )	E <sub>trh</sub> (mm/h)	E <sub>toh</sub> (mm/h)	E <sub>Tr24</sub> (mm/dia)	E <sub>To24h</sub> (mm/dia)
Jataí	22/05/2018	646,49	516,78	81,96	123,96	308,34	0,43	0,48	3,66	4,03
	25/07/2018	574,21	480,51	97,44	156,00	218,69	0,31	0,32	5,37	5,58
	10/08/2018	618,04	565,50	108,16	196,61	256,38	0,36	0,38	4,80	5,05
	11/09/2018	759,42	588,70	167,25	190,15	231,10	0,32	0,33	6,30	6,56
	16/12/2018	914,24	689,76	113,26	234,20	321,73	0,45	0,47	7,08	7,38
	06/03/2019	967,17	637,56	101,45	240,83	293,38	0,41	0,42	5,89	6,03
	09/05/2019	630,46	504,24	71,82	168,87	204,53	0,29	0,35	4,22	5,08
	26/06/2019	558,41	464,50	87,01	126,79	240,20	0,34	0,37	5,34	5,84
	12/07/2019	567,94	478,77	88,40	143,80	239,02	0,34	0,41	3,86	4,48
	28/07/2019	598,83	509,20	98,97	132,46	272,46	0,38	0,49	4,24	5,37
Caiapônia	22/05/2018	586,80	492,20	88,97	216,63	259,80	0,36	0,39	4,13	4,46
	10/08/2018	601,33	536,14	110,73	139,80	304,72	0,43	0,45	5,41	5,77
	27/09/2018	792,93	561,94	129,71	181,60	516,91	0,38	0,61	4,01	6,42
	16/12/2018	855,54	604,21	134,14	160,29	187,21	0,26	0,41	4,58	7,13
	02/02/2019	844,89	663,30	144,09	185,74	353,46	0,50	0,52	5,87	6,11
	26/06/2019	554,20	459,90	61,40	59,21	319,21	0,44	0,47	3,75	3,96
	12/07/2019	561,70	446,43	95,60	95,69	270,20	0,38	0,43	3,96	4,48
	28/07/2019	604,40	480,97	101,45	161,90	238,89	0,34	0,41	3,78	4,65
Chapadão do Sul	30/06/2018	549,68	458,80	91,69	151,60	352,66	0,27	0,33	3,63	4,43
	08/01/2019	883,76	614,42	122,25	141,71	258,66	0,60	0,57	6,36	6,92
	29/03/2019	736,32	606,29	106,78	132,15	246,80	0,50	0,57	5,95	6,53
	16/05/2019	789,32	506,56	70,79	93,66	254,45	0,36	0,46	3,64	4,08
	01/06/2019	551,73	458,54	79,59	144,74	290,26	0,35	0,46	4,46	5,21
	19/07/2019	526,28	477,21	91,71	257,46	115,21	0,36	0,58	5,14	6,37
	05/09/2019	699,38	604,20	136,49	417,57	179,79	0,43	0,61	7,95	8,37

Organização: Dos autores, 2019.

Malamos et. al. (2015), ao estimarem a evapotranspiração de referência para uma região mediterrânea (Grécia Ocidental), determinaram valores médios de E<sub>To24</sub> de 2,38 mm/dia a 5,3 mm/dia para superfícies gramadas. Sun et. al. (2011) encontraram variações de 6,86 mm/dia para campos de junco a 1,51 mm/dia para áreas construídas na região do Lago Nansi, na China.

No Brasil, Freitas et. al (2018) indicaram valores médios de evapotranspiração de referência diária de 2,74 mm/dia a 4,06



mm/dia no município de Surubim, no semiárido pernambucano. Nicácio (2008) identificou valores médios de 8,7 mm/dia em áreas de agricultura irrigada na região de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), também no semiárido nordestino. Martins e Rosa (2019), em estudo realizado na Bacia do Rio Paranaíba, identificaram valores de ETo24 entre 1,3 e 5,7 mm/dia. Para o Sudoeste da Amazônia, em área de clima equatorial, Silva, Lucio e Brown (2015) identificaram valores de referência de 2,37 mm/dia a 4,49 mm/dia.

Percebe-se que os valores de referência estão mais relacionados à demanda atmosférica do que à disponibilidade de água para evaporação, ao contrário da evapotranspiração real (ETr), que depende necessariamente de água no ambiente. Na Bacia Amazônica, por exemplo, a evapotranspiração real é praticamente idêntica à evapotranspiração de referência. Em uma região tropical com chuvas concentradas no verão e inverno seco, Martins e Rosa (2019) estimaram valores de ETr 34% inferiores aos valores de ETo.

Analisando a variação sazonal dos valores de evapotranspiração (Tabela 03), verifica-se que a evapotranspiração real se apresenta 33% inferior aos valores de referência. Considerando a precipitação anual, a ETr corresponde a 79% do total precipitado. De outubro a abril, período chuvoso no Cerrado Brasileiro, foram registrados 798,6 mm de ETr média (58% do total), enquanto que de maio a setembro registrou-se 574,5 mm de ETr média (42% do total).

Ao analisar a distribuição sazonal das precipitações no ano hidrológico 2018/2019, 1608,55 mm (92,6%) ocorreram de outubro a abril e apenas 128,25 mm (7,4%) de maio a setembro. Enquanto todos os meses do período chuvoso apresentam precipitações superiores aos valores de Evapotranspiração de Referência (com exceção de dezembro de 2018 que apresentou precipitações abaixo da média histórica), no período seco a ETo é 85,6% maior que a precipitação, indicando alta demanda atmosférica. Este fato explica a redução significativa da vazão dos cursos d'água e o volume de água em reservatórios de irrigação, abastecimento público e produção de energia.

Tabela 03 - Síntese das variáveis médias de Temperatura do Ar (°C), Precipitação (mm), Evapotranspiração de referência (mm), Evapotranspiração real (mm) e Evapotranspiração real nas bacias (mm) no ano hidrológico 2018/2019.



	T_ar (°C)	Precipitação (m m)	Eto (m m)	Etr (m m)
<b>O u t u b r o</b>	24,28	191,75	169,21	101,08
<b>N o v e m b r o</b>	23,59	368,65	155,42	104,14
<b>D e z e m b r o</b>	24,29	182,05	190,53	131,83
<b>J a n e i r o</b>	24,13	247,18	189,14	133,48
<b>F e v e r e i r o</b>	24,04	242,73	159,09	111,85
<b>M a r ç o</b>	24,13	193,75	171,08	120,02
<b>A b r i l</b>	23,55	182,45	137,81	96,24
<b>M a i o</b>	21,64	77,05	136,49	101,10
<b>J u n h o</b>	20,53	2,80	199,61	128,83
<b>J u l h o</b>	20,01	0,25	152,66	98,44
<b>A g o s t o</b>	22,25	10,25	186,95	120,56
<b>S e t e m b r o</b>	24,73	37,90	213,05	125,56
<b>S o m a</b>	-	<b>1736,80</b>	<b>2061,01</b>	<b>1373,11</b>
<b>M é d i a</b>	<b>23,10</b>	<b>144,73</b>	<b>171,75</b>	<b>114,43</b>
<b>M á x i m o</b>	<b>24,73</b>	<b>368,65</b>	<b>213,05</b>	<b>133,48</b>
<b>M í n i m o</b>	<b>20,01</b>	<b>0,25</b>	<b>136,49</b>	<b>96,24</b>
<b>D P</b>	<b>1,53</b>	<b>112,83</b>	<b>23,38</b>	<b>13,29</b>

Organização: Dos autores, 2019.

Sazonalmente, destaca-se que os maiores volumes de ETr são registrados em meses de baixa precipitação, principalmente agosto e setembro que antecedem o início das chuvas no Cerrado. Quando consideradas as estações do ano, os maiores volumes de ETr são registrados no verão, seguido por inverno, primavera e outono.

## Considerações Finais

A partir dos testes de desempenho realizados, considera-se que o modelo SEBAL tem desempenho muito bom para estimativa de dados diários e sazonais em escala média e pequena, mas que o processo de estimativa de evapotranspiração instantânea/horária necessita de mais avaliações e ajustes. Embora tenha apresentado erros na ordem de 15% para evapotranspiração instantânea/horária e de 12% para evapotranspiração diária, o modelo se mostra adequado para áreas extensas e com pouco

monitoramento instrumental, como é o caso dos vastos espaços centrais do Brasil onde se localiza o Cerrado.

Quanto à marcante sazonalidade das áreas de Cerrado, considera-se que a adequação do modelo apresentou resultados satisfatórios, embora ainda necessite de ajustes no processo de estimativa do fluxo de calor sensível, sobretudo na melhoria das estimativas de resistência aerodinâmica. Outra questão que deveria ser considerada pelo modelo é a diferenciação dos tipos de solo e informações sobre infiltração e percolação, principalmente sobre a capacidade de armazenamento.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (PROCAD) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES/Brasil – Edital CAPES 071/2013 – Processo número 88881.068465/2014-01, em vigência de 2015 a 2020. O primeiro autor agradece a Bolsa de Produtividade em Pesquisa (nível 2) do CNPq por meio do processo 307438/2021-0. O segundo autor agradece a Bolsa de Produtividade em Pesquisa (nível 1D) do CNPq por meio do processo 304973/2017-3.

## Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Hidroweb** – Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: < [http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes\\_historicas\\_abas.jsf#](http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf#)>. Acesso em 15 de janeiro de 2020.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. In: **FAO Irrigation and drainage paper 56**. FAO, v.300, n.9, p. 1-297, 1998.

ALLEN, R. G. et al. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) advanced training and users manual** – Idaho implementation. Idaho: Idaho University, USA, 2002. 98p.

ALLEN, R. G. et al. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Model. In: **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 133, n.04, p.380-394, 2007.

ARIZA, A. **Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)**. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2013. 46p.

BASTIAANSEN, W. G. M., **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**, Tese (Ph.D.), Wageningen Agricultural University, Wageningen: Netherlands, 273f, 1995.

BASTIAANSEN, W. G. M. et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212 – 213, pp. 213 – 229. 1998.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat flux in the irrigated Gediz basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, pp. 87 – 100. 2000.

BEZERRA, B. G. **Balço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri cearense através do algoritmo SEBAL**. Dissertação. UFCG, Campina Grande, PB. 2006.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração

diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. In: **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.01, p.89-97, 1997.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI) INC. **ArcGis versão 10.6.1**. EUA: Environmental Systems Research Institute, 2018.

FREITAS, P. A. S. et al. Evapotranspiração de referência diária por diferentes modelos na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe (Pernambuco – Brasil). In: **Revista brasileira de meio ambiente**, v.04, n.01, p.35-45, 2018.

HARRISON, L.P. **Fundamental concepts and definitions relating to humidity**. Vol. 3, Reinhold Publishing Company. New York. 1963.

HEMAKUMARA, H. M. et al. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer. In **Agricultural Water Management**, v. 58, p. 109-122. 2003.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET) – **Rede de estações automáticas**. Disponível em < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>> Acesso em 10 out. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Projeto PRODES de monitoramento do Cerrado brasileiro por satélite**. Disponível em: < <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/cerrado/increments>>. Acesso em 15 de Janeiro de 2020.

KIMURA, R. et al. Evapotranspiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China base on remote sensing, **Journal of Arid Environments**, v. 68, p. 53-65. 2007.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado Brasileiro. In: **Megadiversidade**, v.01, n.01, p. 147-155, 2005.

LIU, Y.; KAR, S. K. Evapotranspiration Estimation with Remote Sensing and Various Surface Energy Balance Algorithms—A Review. In: **Energies**, v.7, p.2821-2849, 2014.

MALAMOS, M. et al. Estimation of monthly FAO Penman-

Monteith evapotranspiration in GIS environment, through a geometry independent algorithm. In: **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 4, p. 290-299, 2015.

MARTINS, A. P. **Uso de dados do sensor MODIS/AQUA e do algoritmo SEBAL para estimativa da evapotranspiração real na bacia do Rio Paranaíba**. 150 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2015.

MARTINS, A. P.; ROSA, R. Estimativa de evapotranspiração real a partir de imagens do sensor MODIS/AQUA e do algoritmo SEBAL na bacia do Rio Paranaíba – Brasil. In: **Caderno de Geografia**, v. 29, n.57, p. 351-367, 2019.

NICÁCIO, R. M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do Rio São Francisco**. 2008. 337f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

OLIVEIRA, E. A. **Métodos para análise de concordância: estudo de simulação e aplicação a dados de evapotranspiração**. 177 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas:Fundag, 2013. 323 p.

RUHOFF, A. L. **Sensoriamento Remoto aplicado à estimativa de evapotranspiração em biomas tropicais**. 1850 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SILVA, H. J. F.; LUCIO, P. S.; BROWN, I. F. Análise mensal, sazonal e interanual da evapotranspiração de referência para o sudoeste da Amazônia, Acre, Brasil. In: **Revista brasileira de Geografia Física**. v.08, n.09, p. 1711-1729, 2015.

SILVA, E. B.; FERREIRA JÚNIOR, L. G. Taxas de desmatamento e produção agropecuária em Goiás – 2003 a 2007. In: **Mercator**, v.09, n.18, p.121-134, 2010.

SUN, Z. et. al. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. In: **Mathematical and Computer Modelling**, v.54, p.1086-1092, 2011.

TASUMI, M. et al. Operational aspects of satellitebased energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 19, p. 355-376. 2005.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Download de imagens Landsat, SRTM e Sentinel. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em 15 de setembro de 2019


WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation of model performance. In: **Journal of Geophysical Research**, v.90, n.C5, p.8998-9005, 1985.

## Contribuições dos autores


Todos os autores ofereceram substanciais contribuições científicas ao estudo. As tarefas de concepção de design do estudo, preparação e redação do manuscrito, bem como, revisão crítica foram desenvolvidas em grupo.

## Informações dos autores

**Alécio Perini Martins** - Doutor (2015), Mestre (2009), Licenciado e Bacharel (2007) em Geografia pelo Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia. Bolsista de Produtividade em Pesquisa nível 2 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (2022-2025). Docente nos cursos de Graduação e Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Jataí, onde foi coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geografia (Mestrado e Doutorado) no período de 2019 a 2021.

 <https://orcid.org/0000-0002-4485-0336>

**Emerson Galvani** - Concluiu o doutorado em Agronomia (Energia na Agricultura) [Botucatu] pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho em 2001. Mestre em Agrometeorologia pela ESALQ/USP em 1995. Atualmente é Professor Doutor da Universidade de São Paulo. Bolsista de pesquisa e produtividade do CNPq (1D). Presidente da Associação Brasileira de Climatologia - ABCLIMA (gestão 2008 - 2010). Representante da área de Geografia junto ao CNPq (3/7/2020 atual).

 <https://orcid.org/0000-0002-8082-5963>

Recebido para publicação em 11 de outubro de 2022

Aceito para publicação em 9 de dezembro de 2022

Publicado em 30 de dezembro de 2022