

Mapeamento espaço-temporal da evapotranspiração na bacia do rio Paracatu utilizando imagens MODIS e o algoritmo SAFER**Spatio-temporal mapping of evapotranspiration in the Paracatu River basin using MODIS images and SAFER algorithm**

DOI: 10.34188/bjaerv3n3-088

Recebimento dos originais: 20/05/2020

Aceitação para publicação: 20/06/2020

Ricardo Guimarães Andrade

Doutor em Meteorologia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa
Instituição: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA
Endereço: Rua Eugênio do Nascimento, 610, Dom Bosco, Juiz de Fora-MG, Brasil
E-mail: ricardo.andrade@embrapa.br

Evaldo de Paiva Lima

Doutor em Meteorologia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa
Instituição: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA
Endereço: Rua Antônio Falcão, 402, Boa Viagem, Recife-PE, Brasil
E-mail: evaldo.lima@embrapa.br

Antônio Heriberto de Castro Teixeira

Doutor em Ciências Ambientais pela Wageningen University
Instituição: Universidade Federal de Sergipe - UFS
Endereço: Avenida Marechal Rondon, s/n, Jardim Rosa Elze, São Cristóvão-SE, Brasil
E-mail: heribert@globomail.com

Janice Freitas Leivas

Doutor em Fitotecnia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituição: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA
Endereço: Avenida Soldado Passarinho, 303, Fazenda Chapadão, Campinas-SP, Brasil
E-mail: janice.leivas@embrapa.br

Daniel de Castro Victoria

Doutor em Ciências pela Universidade de São Paulo
Instituição: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA
Endereço: Avenida André Tosello, 209, Cidade Universitária, Campinas-SP, Brasil
E-mail: daniel.victoria@embrapa.br

Alexandro Gomes Facco

Doutor em Meteorologia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa
Instituição: Universidade Federal do Espírito Santo – CEUNES/UFES
Endereço: Rodovia Governador Mário Covas, Litorâneo, São Mateus-ES, Brasil
E-mail: alexandro.facco@ufes.br

RESUMO

As técnicas de sensoriamento remoto têm sido muito promissoras para o desenvolvimento de medidas mais confiáveis e economicamente viáveis da produção vegetal em grandes áreas. O algoritmo SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) é um algoritmo simplificado que tem apresentado bons resultados na estimativa da evapotranspiração (ET) em larga escala. Este trabalho objetivou o uso do SAFER e imagens MODIS para estimativa da ET na bacia do rio Paracatu. Os valores médios de evapotranspiração, para o ano de 2011, variaram de $0,60 \pm 0,57 \text{ mm d}^{-1}$ a $2,40 \pm 1,04 \text{ mm d}^{-1}$, com média anual de $1,50 \pm 0,76 \text{ mm d}^{-1}$. Para algumas áreas irrigadas, foram observados valores de evapotranspiração superiores a $3,5 \text{ mm d}^{-1}$, o que representa mais que o dobro do valor médio de toda a bacia. Em geral, o SAFER gerou resultados satisfatórios em larga escala e esta metodologia tem potencial para ser aplicada no planejamento e monitoramento espaço-temporal da demanda hídrica, principalmente em bacias que apresentam conflitos ou riscos de perda de produtividade das culturas pela escassez hídrica regional.

Palavras-chave: Recursos hídricos, sustentabilidade, indicadores ambientais, sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Remote sensing techniques have been very promising for the development of more reliable and economically viable measures of plant production in large areas. The Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving (SAFER) is a simplified algorithm that has shown good results in estimating large-scale evapotranspiration (ET). This work aimed to use SAFER and MODIS images to estimate ET in the Paracatu River basin. The average values of evapotranspiration, for the year 2011, ranged from $0.60 \pm 0.57 \text{ mm d}^{-1}$ to $2.40 \pm 1.04 \text{ mm d}^{-1}$, with an annual average of $1.50 \pm 0.76 \text{ mm d}^{-1}$. For some irrigated areas, evapotranspiration values greater than 3.5 mm d^{-1} were observed, which represents more than double the average value of the entire basin. In general, SAFER has generated satisfactory results on a large scale and this methodology has the potential to be applied in the spatio-temporal planning and monitoring of water demand, especially in basins that present conflicts or risks of loss of crop productivity due to regional water scarcity.

Keywords: Water resources, sustainability, environmental indicators, remote sensing.

1 INTRODUÇÃO

A bacia do Paracatu, situada no Médio São Francisco, contribui com cerca de 20% na formação da vazão do rio São Francisco. Porém, nas últimas décadas a agricultura irrigada teve grande expansão e muitos são os conflitos pelo uso dos recursos hídricos nesta bacia (Rodríguez et al., 2007). Assim, conhecer a demanda evapotranspirativa de uma bacia hidrográfica tanto no espaço quanto no tempo pode ser essencial para auxiliar no uso racional dos recursos hídricos diminuindo ou amenizando os riscos de perdas da produção agropecuária por meio de tomadas de decisões voltadas para um planejamento hídrico eficiente e sustentável.

Nas últimas décadas a comunidade científica mundial tem enfatizado nos mais diversificados meios de comunicação a importância da preservação e do uso sustentável dos recursos naturais. Os cenários das mudanças climáticas globais e seus efeitos no meio ambiente, por exemplo, têm sido uma preocupação constante da humanidade (Lima et al., 2009; Lima et al., 2019).

Hamada (2007) relata que o Brasil é um país que possui sua economia fortemente dependente de recursos naturais diretamente ligados ao clima em especial na agricultura. Diante desta questão, o conhecimento da distribuição espaço-temporal da demanda hídrica por processos evapotranspirativos auxilia tanto no planejamento como na utilização dos recursos hídricos. As técnicas de sensoriamento remoto possibilitam o diagnóstico e a geração de mapas de forma dinâmica (Silva, 2006; Andrade et al., 2018).

Os sensores dos satélites captam imagens da terra de modo contínuo, abrangendo extensas áreas e fornecendo informações atualizadas, que são extraídas por meio de técnicas de interpretação visual e de processamento automático das imagens. De acordo com Bastiaanssen (2000), o sensoriamento remoto oferece grandes vantagens, como a obtenção de informações que possibilitam a geração de séries temporais da região em estudo, facilitando a comparação entre elas. Nesse sentido, tem crescido o número de pesquisas que empregam técnicas de sensoriamento remoto não apenas na identificação de áreas de cultivo, mas também na estimativa de parâmetros biofísicos a serem utilizados em modelos de crescimento, produtividade, hidrológicos, etc.

O SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) é um algoritmo simplificado que tem apresentado bons resultados na estimativa da evapotranspiração (ET) e da biomassa vegetal (Bio) em larga escala (Teixeira et al., 2013a; Andrade et al., 2016). Esse algoritmo tem a vantagem de não ser obrigatória o uso da banda termal e de poder ser aplicado com dados meteorológicos provenientes de diferentes tipos de estações (agrometeorológicas, convencionais e automáticas) sendo essa uma característica importante por possibilitar a avaliação das tendências históricas dos componentes do balanço de energia e da produtividade da água em larga escala ao longo dos anos, haja vista que sensores automáticos são avanços relativamente recentes na tecnologia instrumental (Teixeira et al., 2013b).

Assim, o uso de imagens orbitais conjuntamente com modelos e/ou algoritmos são fundamentais, haja vista que o mapeamento espaço-temporal da evapotranspiração pode contribuir para análises espacialmente explícitas por meio do cruzamento de planos de informações referentes a parâmetros biofísicos gerando como resultado algum tipo de indicador de sustentabilidade das áreas de produção agropecuária.

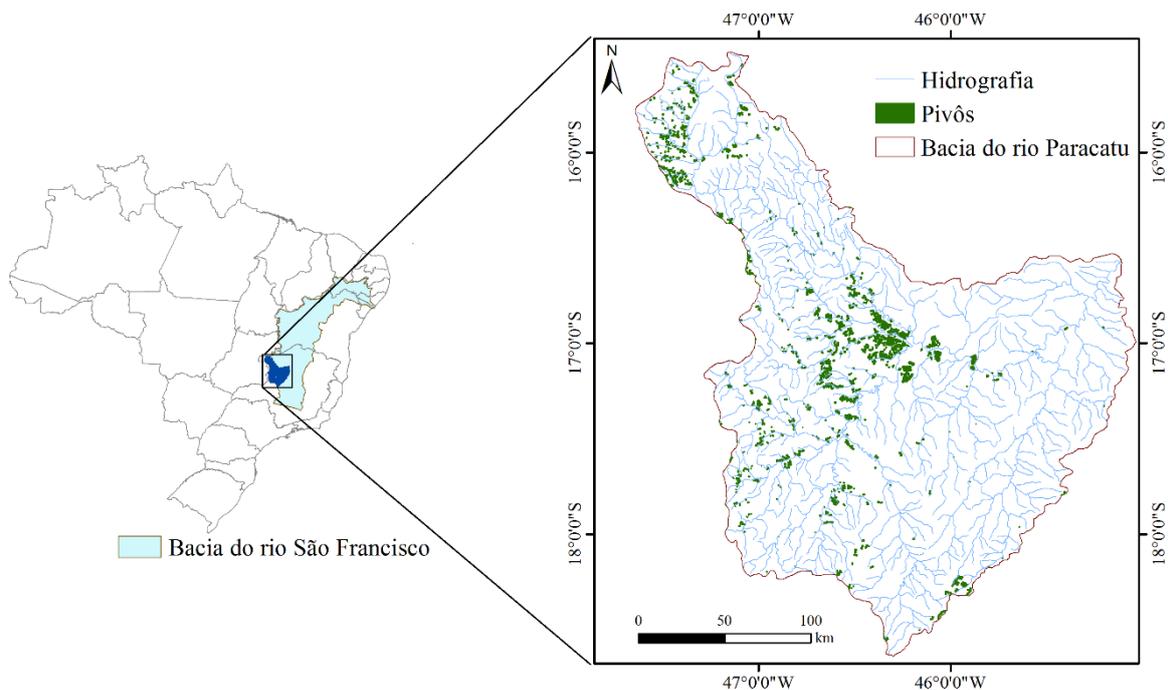
O presente estudo objetivou aplicar imagens MODIS e o algoritmo SAFER para o mapeamento espaço-temporal da evapotranspiração na bacia do rio Paracatu de forma a auxiliar na avaliação ambiental e obtenção de indicadores de sustentabilidade voltados para tomada de decisão.

2 METODOLOGIA

A área de estudo tem por abrangência a bacia do rio Paracatu que está situada no Médio São Francisco e drena uma área de aproximadamente 45.600 km², sendo a segunda maior sub-bacia do rio São Francisco (Figura 1). Localiza-se quase integralmente no estado de Minas Gerais (92%), incluindo apenas 5% de sua área no estado de Goiás e 3% no Distrito Federal (Dino, 2003).

Na região da bacia do rio Paracatu predomina o clima tropical chuvoso, sendo que as chuvas se concentram no período de outubro a abril, com destaque para o trimestre novembro, dezembro e janeiro como o mais chuvoso (Lima et al., 2019). A precipitação média anual é de 1.338 mm, enquanto a evapotranspiração média anual é de 1.140 mm (Brasil, 1996). Ressalta-se que a maior parte das áreas irrigadas estão concentradas nas cabeceiras até a metade do sistema de drenagem da bacia (Lima et al., 2019).

Figura 1 - Localização da bacia do rio Paracatu.



Informações meteorológicas de estações pertencentes ao INMET, na escala diária com posterior interpolação, foram utilizadas como parâmetro de entrada no algoritmo SAFER. Por meio desse algoritmo, estimou-se o albedo de superfície (α_0), para datas entre janeiro e dezembro de 2011, a partir das bandas 1 e 2 do MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*) com resolução espacial de 250 m e composição de 16 dias:

$$\alpha_0 = a + b\alpha_1 + c\alpha_2 \quad (1)$$

Em que, α_1 e α_2 são refletâncias nas faixas espectrais das bandas 1 e 2 do sensor MODIS, e; a, b e c são coeficientes de regressão e que apresentam respectivamente os valores de 0,08; 0,41 e 0,14 (Teixeira et al., 2013a).

A temperatura da superfície (T_o) foi estimada como resíduo da equação do saldo de radiação diário (R_n), descrita por:

$$R_n = (1 - \alpha_0) R_{s\downarrow} - a_1 \tau_w \quad (2)$$

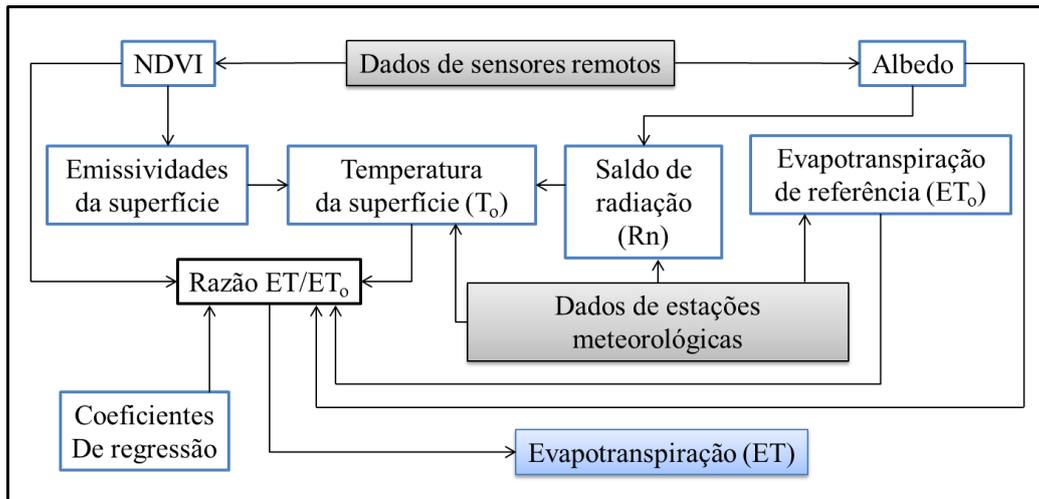
Em que, α_0 é o albedo da superfície, τ_w é a transmissividade atmosférica, $R_{s\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente, a_1 é o coeficiente de regressão com distribuição espacial ao relacioná-lo com a temperatura do ar (Teixeira et al., 2013a).

Com o auxílio dos mapas do albedo e temperatura da superfície, e do NDVI foi possível estimar a ET por meio da seguinte equação:

$$ET = \exp \left[\beta + \eta \left(\frac{T_o}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] ET_o \quad (3)$$

Em que, β e η são os coeficientes de regressão, com respectivos valores de 1,8 e -0,008 (Teixeira et al., 2013a) e ET_o é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}) obtida pelo método de Penman-Monteith FAO N° 56, conforme descrito em Allen et al. (1998). Na Figura 2 visualiza-se as etapas de cálculo envolvidas na aplicação do algoritmo SAFER para estimativa da ET.

Figura 2 – Fluxograma das etapas de processamento para estimativa da evapotranspiração por meio do algoritmo SAFER.

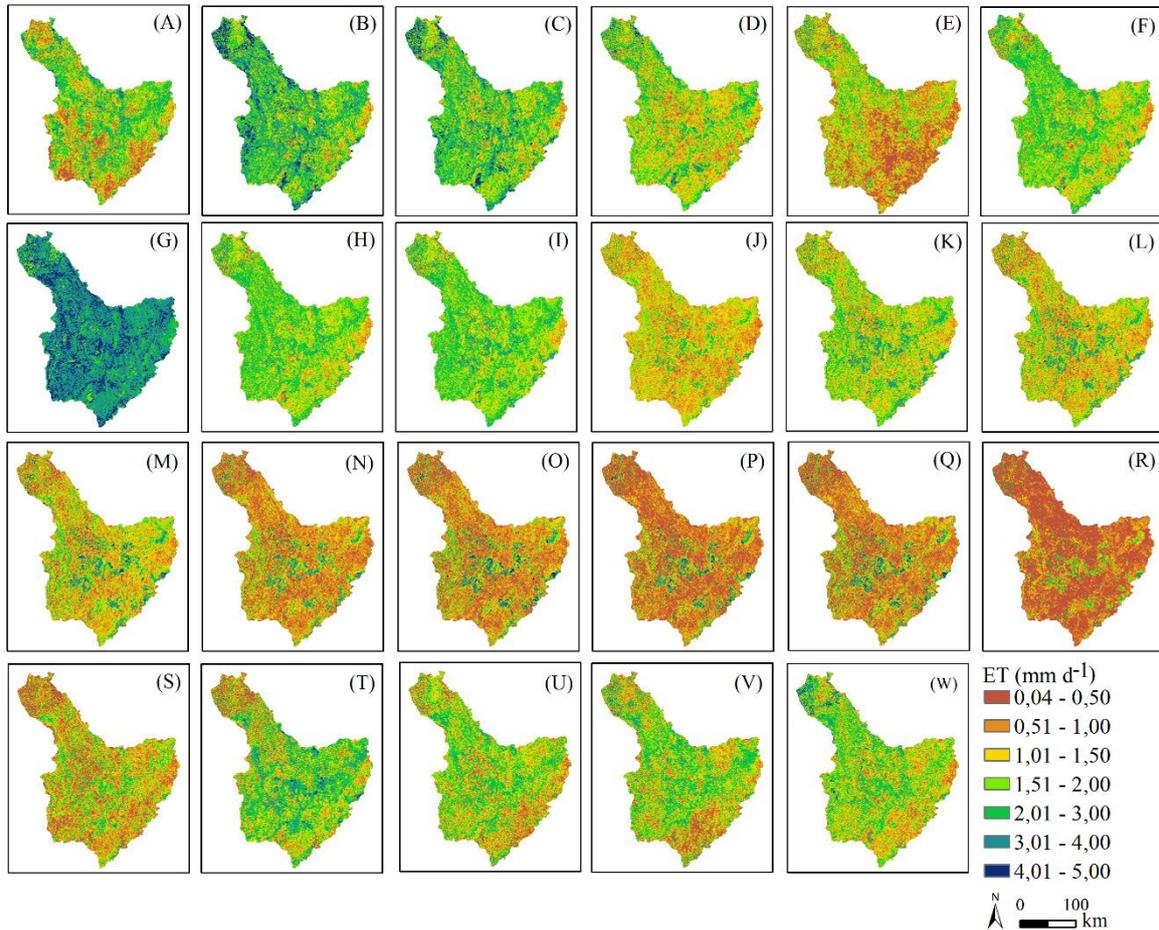


Para extração dos dados de ET das áreas irrigadas foi aplicada a classe de identificação de pivôs disponível para download em formato “shapefile” no site da ANA (Agência Nacional de Águas), mais especificamente na página cujo o título é Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil (ANA e Embrapa Milho e Sorgo, 2019). Para tanto, os dados foram acessados diretamente para download por meio do seguinte link: <<https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home?uuid=e2d38e3f-5e62-41ad-87ab-990490841073>>.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os mapas temáticos da ET, obtidos por meio do SAFER, para a bacia do rio Paracatu. Pode-se observar que, os mapas foram marcados pela grande variabilidade espacial, ao longo do ano, com menores valores de ET, na maior parte da bacia no dia 30 de setembro e maiores valores no dia 17 de janeiro de 2011. A variação espacial da ET observada em cada um dos mapas pode ser explicada pelas diferentes superfícies presentes na bacia do rio Paracatu (cerrado, pastagem, áreas irrigadas com diferentes tipos de culturas, cursos d’água, etc).

Figura 3 - Mapas de evapotranspiração real diária estimada por meio do SAFER para as seguintes datas: 1 de janeiro (a), 17 de janeiro (b), 2 de fevereiro (c), 18 de fevereiro (d), 6 de março (e), 22 de março (f), 7 de abril (g), 23 de abril (h), 9 de maio (i), 25 de maio (j), 10 de junho (k), 26 de junho (l), 12 de julho (m), 28 de julho (n), 13 de agosto (o), 29 de agosto (p), 14 de setembro (q), 30 de setembro (r), 16 de outubro (s), 1 de novembro (t), 17 de novembro (u), 3 de dezembro (v) e 19 de dezembro (w) de 2011.



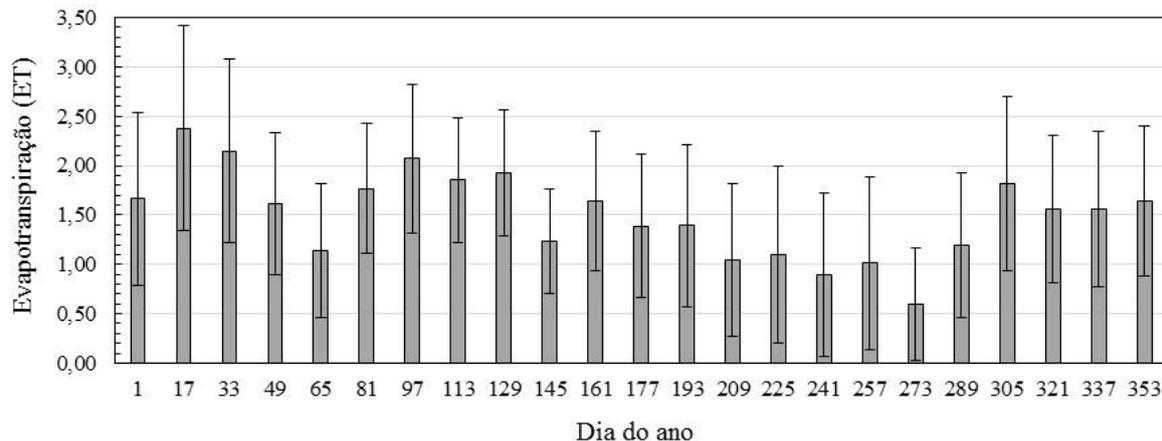
Na região da bacia do rio Paracatu, as chuvas se concentram no período de outubro a abril, com destaque para o trimestre novembro, dezembro e janeiro como o mais chuvoso (Brasil, 1996). Isso ratifica o comportamento dos valores de ET observados na Figura 3, ou seja, a ET foi maior no período chuvoso e menor no período seco.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 4, os valores médios de ET na bacia do rio Paracatu variaram de $0,60 \pm 0,57 \text{ mm d}^{-1}$ (setembro) a $2,40 \pm 1,04 \text{ mm d}^{-1}$ (janeiro), com média anual de $1,50 \pm 0,76 \text{ mm d}^{-1}$. Além disso, ressalta-se que em alguns casos de áreas irrigadas foram observados valores de ET superiores a $3,5 \text{ mm d}^{-1}$, sendo mais que o dobro do valor médio de toda a bacia.

Teixeira et al. (2020) aplicaram dados MODIS e o algoritmo SAFER na bacia do rio São Francisco para estimar a ET e a biomassa e monitorar a produtividade da água, os autores obtiveram valores médios trimestrais de ET, na parte alta e média da bacia, variando entre $1,00 \pm 0,80 \text{ mm d}^{-1}$ e

$2,90 \pm 0,90 \text{ mm d}^{-1}$. Em pesquisa realizada na bacia hidrográfica do córrego Cabeceira Comprida, em Santa Fé do Sul, SP, utilizando o SAFER e imagens Landsat-8 do ano de 2015, Coaguila et al. (2017) obtiveram valores médios de ET variando entre $0,23 \text{ mm d}^{-1}$ (Dia 255) e $1,87 \text{ mm d}^{-1}$ (Dia 15).

Figura 4 – Valores médios de evapotranspiração (ET) diária juntamente com os respectivos desvios-padrão para a área de delimitação da bacia do rio Paracatu, no ano de 2011.

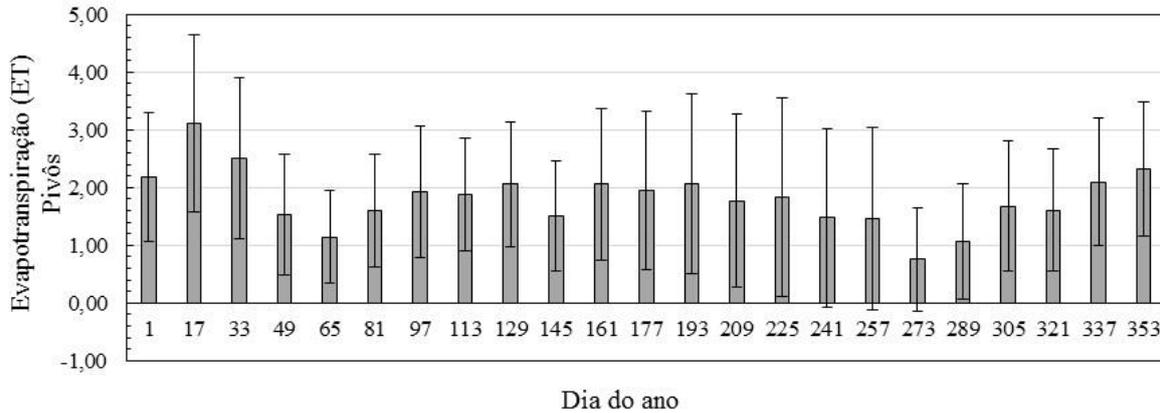


Na Figura 5 visualizam-se os valores médios de ET para as áreas de agricultura irrigada por meio de sistemas de pivôs centrais. Nota-se que as maiores médias de ET foram observadas nos meses de janeiro (Dia 1: $2,19 \pm 1,11 \text{ mm d}^{-1}$, Dia 17: $3,10 \pm 1,54 \text{ mm d}^{-1}$), fevereiro (Dia 33: $2,50 \pm 1,40 \text{ mm d}^{-1}$) e dezembro (Dia 337: $2,10 \pm 1,10 \text{ mm d}^{-1}$, Dia 353: $2,32 \pm 1,16 \text{ mm d}^{-1}$) de 2011. A ET média anual das áreas de pivôs foi de $1,81 \pm 1,21 \text{ mm d}^{-1}$. Também é possível observar que os desvios em relação à média de ET foram maiores nas áreas de pivôs. Isso pode ser um indicativo da grande variabilidade dos estádios de desenvolvimento das culturas irrigadas por pivôs na bacia do rio Paracatu, sendo que no dia 225 o valor médio de ET teve o maior desvio-padrão ($1,83 \pm 1,72 \text{ mm d}^{-1}$). Por outro lado, no dia 273 o desvio-padrão foi maior que o valor médio de ET ($0,76 \pm 0,89 \text{ mm d}^{-1}$). Nesse caso, muitas áreas irrigadas podem estar com culturas em estádios iniciais de desenvolvimento e que apresenta grande exposição do solo ou estar com culturas em estádios finais (senescência da vegetação), sendo estas possíveis justificativas para o baixo valor médio de ET. Entretanto, o maior desvio-padrão pode indicar que também haviam áreas de pivôs com culturas vigorosas em estádios bem desenvolvidos (estádio vegetativo), ou seja, que necessitam de mais água para atender a demanda pelos processos evapotranspirativos.

Os resultados obtidos tiveram valores médios de ET com respaldo na literatura e, assim como observado por Santos et al. (2020), ficou evidente que a metodologia de estimativa de ET por meio

do algoritmo SAFER tem grande potencial para ser aplicada no monitoramento espaço-temporal da demanda hídrica da agricultura irrigada.

Figura 5 – Valores médios de evapotranspiração (ET) diária juntamente com os respectivos desvios-padrão para as áreas de pivôs na bacia do rio Paracatu, no ano de 2011.



4 CONCLUSÕES

De forma geral, a utilização do algoritmo SAFER com imagens MODIS mostrou-se relevante na estimativa da ET em larga escala. Isso favorece análises de balanço hídrico regional auxiliando no planejamento e monitoramento espaço-temporal da demanda hídrica da agricultura irrigada, principalmente em bacias que apresentam conflitos ou riscos de perda de produtividade das culturas pela escassez hídrica regional. A técnica utilizada possui grande potencial de aplicação em estudos de quantificação da ET em bacias hidrográficas e pode auxiliar na compreensão da dinâmica de processos ambientais e tomadas de decisão pelos gestores.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO, 1998. 328 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56). Disponível em: <<http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>>. Acesso em: 09 jul. 2020.
- ANA; EMBRAPA MILHO E SORGO. Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil (1985-2017). Segunda Edição. 2019. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br>>. Acesso em: 14 jul. 2020.
- ANDRADE, R. G.; HOTT, M. C.; MAGALHAES JUNIOR, W. C. P. Estimativa da evapotranspiração em áreas de pastagens usando algoritmo SEBAL e imagens Landsat 5 - TM. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 1, p. 362-372, 2018.
- ANDRADE, R. G.; TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; NOGUEIRA, S. F. Analysis of evapotranspiration and biomass in pastures with degradation indicatives in the Upper Tocantins River Basin, in Brazilian Savanna. **Revista Ceres**, v. 63, p. 754-760, 2016.
- BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL – based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v.229, p.87-100, 2000.
- BRASIL – Governo Federal. MINAS GERAIS; Governo do Estado. DISTRITO FEDERAL. **Plano diretor de recursos hídricos da bacia do rio Paracatu – PLANPAR**. [S. l.]: 1996. v. 1, T. 1. (CD-ROM).
- HAMADA, E. Mudanças climáticas globais e recursos hídricos com enfoque para as bacias hidrográficas. In: Simpósio Internacional em Manejo de Microbacias – Sustentabilidade Ambiental da Água e Aquecimento Global, 2., 2007, Botucatu. **Anais...** Botucatu: UNESP/FCA, 2007. p. 1-11.
- LIMA, E. P.; ANDRADE, R. G.; SEDIYAMA, G. C.; DELGADO, R. C.; FERREIRA, A. S.; CAPUTI, E.; FERREIRA, W. J. Estudo da evapotranspiração real diária utilizando imagem de satélite na bacia do rio Paracatu. In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, SERVIÇOS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE, 2., Taubaté. **Anais...** Taubaté: UNITAU, 2009. p. 1-8.
- LIMA, E. P.; ANDRADE, R. G.; SEDIYAMA, G. C.; BOF, L. H. N. Temporal-spatial Control of the difference between Precipitation and Evapotranspiration in Paracatu Sub-basins. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 6, p. 617-622, 2019.
- RODRIGUEZ, R. G.; PRUSKI, F. F.; NOVAES, L. F.; RAMOS, M. M.; SILVA, D. D.; TEIXEIRA, A. F. Estimativa da demanda de água nas áreas irrigadas da bacia do rio Paracatu. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 172-179, 2007.
- SANTOS, J. E. O.; CUNHA, F. F.; FILGUEIRAS, R.; SILVA, G. H.; TEIXEIRA, A. H. C.; SILVA, F. C. S.; SEDIYAMA, G. C. Performance of SAFER evapotranspiration using missing meteorological data. **Agricultural Water Management**, v. 233, 106076, p. 1-8, 2020.

SILVA, B. B.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, n. 2, p. 174-186, 2006.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, M-UD-D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 462-476, 2009a.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, M-UD-D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part B: Application to the large scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 477-490, 2009b.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; TAKEMURA, C. M.; LEIVAS, J. F.; PACHECO, E. P.; BAYMA-SILVA, G.; GARÇON, E. A. M. Water productivity monitoring by using geotechnological tools in contrasting social and environmental conditions: Applications in the São Francisco River basin, Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, 100296, p. 1-9, 2020.