

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO UTILIZANDO ALGORITMO AUTOMATIZADO DO SEBAL: O CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IPANEMA

Alexandro Medeiros Silva¹, Richarde Marques da Silva², Celso Augusto Guimarães Santos³,
Victor Hugo Rabelo Coelho⁴

^{1,2} Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Departamento de Geociências/CCEN, João Pessoa - PB, Brasil, 58051-900
medeiros_alexandro@hotmail.com¹; richarde@geociencias.ufpb.br²

³ Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/CT, João Pessoa - PB, Brasil, 58051-900
celso@ct.ufpb.br⁶; victor-coelho@hotmail.com

RESUMO

A evapotranspiração (ET) é um fenômeno fundamental para entender os principais processos do sistema terrestre envolvendo a água no solo e na atmosfera, pois é um dos principais componentes na produção de energia na Terra e no controle do balanço hídrico. Neste estudo, um algoritmo automatizado do SEBAL foi criado para estimar ET e aplicado em 282 imagens MODIS para a bacia do rio Ipanema, localizada no semiárido do Brasil. Os resultados da ET diária média variaram entre 1,63 mm/dia e 6,22 mm/dia, com ET média diária de 3,86 mm/dia e com um desvio padrão de 0,97 mm/dia. O algoritmo utilizado mostrou-se ser uma ferramenta eficiente para a aplicação de uma grande quantidade de imagens, tornando uma tarefa menos complexa, com menor incidências de erros e com um tempo de execução bem menor quando comparado ao método tradicional de aplicação do algoritmo.

Palavras-chave — Evapotranspiração, MODIS, Semiárido.

ABSTRACT

Evapotranspiration (ET) is a fundamental phenomenon to the main processes of the terrestrial system involving water on land and in the atmosphere because it is one of the main components of energy production on Earth and controls the water balance. In this study, SEBAL was applied to automate endmember pixel selection and evapotranspiration for 282 images of the Ipanema River Basin, located in a semiarid area of Brazil. The results of mean daily ET ranging from 1.63 mm/day to 6.22 mm/day, presenting a mean ET of 3.86 mm/day and a standard deviation of 0.97 mm/day. The proposed automated algorithm was shown to be an efficient tool for applications with a large number of images, making it a less complex task, with lower error incidences and a much shorter execution time than the traditional method for applying the algorithm.

Key words — Evapotranspiration, MODIS, semi-arid.

1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) é um dos principais componentes na produção de energia na Terra e, consequentemente, no controle do balanço hídrico [1]. A ET é fundamental para entender os principais processos do sistema terrestre envolvendo a água no solo e na atmosfera [2]. A ET consome cerca de 60% da precipitação anual, e, portanto, o monitoramento desse processo é importante para entender os demais processos do ciclo hidrológico [3]. Entretanto, mensurar a ET sempre foi tarefa difícil, seja utilizando métodos tradicionais com lisímetros [4] ou indiretos usando equações baseadas em elementos meteorológicos mediante imagens orbitais [5]. A ET envolve um grande número de fatores ambientais (tipos de vegetação, tipos de solo, temperatura do ar e da superfície, umidade do ar e do solo, radiação incidente, pluviosidade, velocidade do vento e pressão atmosférica) que afetam de maneira complexa esse processo. O SEBAL assume uma relação linear entre a temperatura de dois níveis: entre a temperatura de superfície e do ar em uma altura de referência de 2 m para realizar as estimativas dos fluxos de calor sensível e latente, que é a base do algoritmo [6]. Para tanto, o SEBAL faz uso de imagens de satélite e um pequeno conjunto de informações meteorológicas de superfície, que incluem velocidade do vento e temperatura do ar, para resolver o balanço de energia. Dentre seus principais produtos estão albedo de superfície, índices de vegetação, temperatura de superfície, saldo de radiação, fluxo de calor no solo, fluxo de calor latente e a ET, todos calculados para cada pixel da imagem.

Com isso, a automatização da aplicação do algoritmo SEBAL, bem como, do processo de seleção dos pixels âncora para aplicação do algoritmo SEBAL utilizando uma série longa de imagens do MODIS surge como uma importante alternativa para as estimativas de ET e do balanço de energia. Assim, este estudo teve como objetivo desenvolver um algoritmo para automatizar a aplicação de todas as etapas do SEBAL em ambiente MATLAB[®] para estimar a ET para longas séries temporais de imagens orbitais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo escolhida foi a bacia hidrográfica do rio Ipanema (BHRI), que está localizada entre as coordenadas 08° 18' 04" e 09° 23' 24" de Latitude Sul; 36° 36' 28" e 37° 27' 54" de Longitude Oeste. A BHRI possui uma área de 7.954,32 km² (Figura 1), é uma das sub-bacias do rio São Francisco, está localizada na região Nordeste do Brasil e está inserida totalmente no bioma Caatinga. A BHRI apresenta precipitação média anual inferior a 700 mm e temperaturas máximas e mínimas médias diárias de 29.45°C e 18.44°C, respectivamente. A ET potencial média anual é de aproximadamente 1.600 mm, apresentando assim um déficit hídrico na bacia durante a maior parte do ano [7].

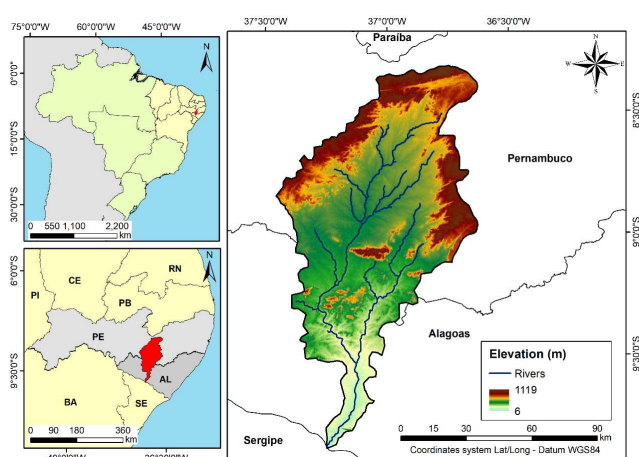


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo no Nordeste

2.2. Obtenção das imagens de satélite

Nós projetamos especificamente nosso algoritmo de automação para trabalhar com imagens MODIS dos satélites Terra (MOD) e Aqua (MYD), disponíveis em <http://reverb.echo.nasa.gov>. Neste estudo foram utilizados os produtos de reflectância MOD09A1 e MYD09A1 e os produtos MOD11A2 e MYD11A2 de temperatura e emissividade da superfície. Esses produtos são uma composição pixel a pixel da melhor observação em um período de oito dias. Essa escolha permitiu a aquisição de um maior número de imagens, em que a cobertura de nuvens não atrapalhasse as estimativas realizadas. Assim, foi possível adquirir até quatro desses satélites para cada mês da área de estudo.

Entretanto, observou-se que, para a área de estudo, as imagens que apresentavam o percentual de qualidade superior a 55% estariam aptas a serem utilizadas na estimativa da ET. Com isso, foram utilizadas 282 imagens da área de estudo, do tile h14_v09, sendo 164 do satélite Terra e 118 do satélite Aqua, todas do período de janeiro 2005 a dezembro 2015, devido ao fato de ser o período no

qual se iniciaram as coletas de dados climatológicos observados horários (temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação e pressão atmosférica), coletados na estação meteorológica automática de Arcoverde, localizada nas coordenadas 08° 26' S e 37° 03' O, sob responsabilidade do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

2.3. Automatização do algoritmo SEBAL e estimativa da evapotranspiração

Para determinar a ET, o SEBAL utiliza três etapas: (a) o saldo de radiação (R_n), (b) o fluxo de calor sensível (H) e (c) o fluxo de calor latente (LE). A principal característica do algoritmo SEBAL que difere dos demais algoritmos que estimam a ET está na estimativa da densidade do fluxo de calor sensível (H). A etapa para obtenção do H foi estimado com base na velocidade do vento, velocidade de fricção e temperatura de superfície (T_s), usando-se uma calibração interna da diferença da temperatura entre dois níveis próximos a superfície [5]. Essa etapa foi obtida a partir de um processo iterativo para a obtenção das constantes de calibração “a” e “b” (Eq. 1), bem como para as correções de estabilidade da atmosfera e da velocidade e resistência aerodinâmica.

$$H = \frac{\rho_a c_p (a + b T_s)}{r_{ah}} \quad (1)$$

sendo ρ_a massa específica do ar; c_p o calor específico do ar (1004 J/kg/K); a e b , como já explicado, são constantes de calibração da diferença entre a temperatura de superfície e do ar em uma altura de referência de 2 m; r_{ah} a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (m/s).

Neste estudo, esse processo iterativo foi repetido n vezes até que a condição de estabilidade atmosférica fosse obtida. Com o processo iterativo concluído e o H calculado, utilizou-se a Eq. 2 para determinar o fluxo de calor latente (W/m^2) [6].

$$LE = R_n - G - H \quad (2)$$

sendo R_n o saldo de radiação a superfície, G o fluxo de calor no solo e o H o fluxo de calor sensível.

Posteriormente, a fração evaporativa instantânea (Eq. 3) e a ET diária (Eq. 4) foram estimadas, com base nos trabalhos em [6] e [8], respectivamente.

$$FE_i = \frac{LE}{R_n - G} \quad (3)$$

sendo LE , R_n e G os valores instantâneos do fluxo de calor latente (W/m^2), saldo de radiação (W/m^2) e fluxo de calor no solo (W/m^2), respectivamente.

$$ET_{24h} = 0,035 FE_i R_{n24} \quad (4)$$

no qual FE_i é a fração evaporativa instantânea e o R_{n24h} é o saldo de radiação na superfície em 24 horas (W/m^2).

Neste estudo, a aplicação do algoritmo SEBAL foi totalmente automatizada utilizando uma rotina computacional desenvolvida no *software* MATLAB®. Esse algoritmo pode ser executado para uma quantidade indefinida de imagens, desde que os dados climatológicos de entrada estejam organizados.

2.4. Determinação dos pixels âncoras no SEBAL automatizado

A determinação dos pixels âncoras no SEBAL automatizado foi realizada pela distribuição de valores dos parâmetros biofísicos obtidos pelos seus quartis (que são pontos estabelecidos em intervalos regulares a partir de uma função de distribuição). Tabela 1 apresenta os valores dos quartis utilizados como limites de cada variável para o conjunto de imagens utilizadas neste estudo. Os valores obtidos em cada quartil foram utilizados como os limites para a seleção dos pixels, que tem como objetivo selecionar em toda a imagem apenas os pixels que se enquadram dentro dos intervalos definidos.

Tabela 1. Definição dos limites para criação das máscaras

Variável	Limites	
	Pixel frio	Pixel quente
Albedo	< 2º. quartil	> 3º. quartil
NDVI	> 4º. quartil	> 0.10 e < 1º. quartil
T_s	< 1º. quartil	> 3º. quartil

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as 282 imagens utilizadas neste estudo, o SEBAL automatizado selecionou em média 265 e 373 pixels elegíveis como âncoras frios e âncoras quentes, respectivamente, para cada imagem, o que representa 0,2% e 0,3%, respectivamente, de todos os pixels existentes na imagem. Esses resultados mostram que as etapas de seleção automatizada dos pixels âncoras reduzem para cerca de 0,5% a quantidade de pixels que podem ser selecionados como âncoras em uma imagem, tornando assim, a seleção mais segura, precisa e rápida.

A Figura 2 mostra os valores dos pixels âncoras selecionados para toda a série de imagens analisadas. Para os pixels âncoras quentes, foram selecionados aqueles com valores de T_s variando de 30,23 a 69,97°C. Baseado nos resultados obtidos, os pixels âncoras quentes apresentaram valores de T_s média de 51,15°C, enquanto os pixels âncoras frios selecionados apresentaram valores de T_s média variando entre 11,27 e 39,39°C, apresentando valor médio de 28,35°C. Como esperado, os resultados obtidos para a BHRI mostraram que os pixels âncoras quentes apresentaram uma maior amplitude térmica ao longo da série.

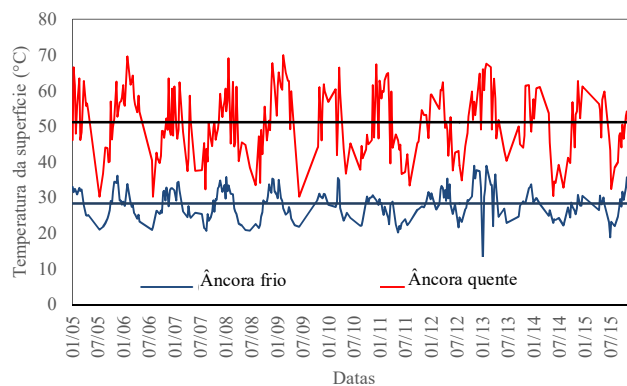


Figura 2. Distribuição dos valores dos pixels âncoras frios e quentes selecionados pelo SEBAL automatizado.

No que tange aos pixels âncoras frios, a amplitude térmica foi bem menor, porque o SEBAL automatizado seleciona como âncoras frios, apenas os pixels que apresentam os maiores valores de NDVI de cada imagem, ou seja, são selecionados os pixels localizados em áreas de vegetação mais densa, o que implica em uma menor variação térmica.

A Figura 3 mostra a variabilidade da ET diária média para a BHRI. Com base nessa figura, percebe-se que houve uma diminuição dos valores diários médios de ET entre 2009 e 2015. Esse fato deve-se às modificações no uso e cobertura da terra durante o período, bem como às alterações no comportamento pluviométrico da bacia. Os resultados da ET diária média para a BHRI variaram entre 1,63 mm/dia e 6,22 mm/dia. Para as 282 imagens, a ET média diária obtida pelo SEBAL automatizado foi de 3,86 mm/dia, com um desvio padrão de 0,97 mm/dia. Esses resultados obtidos no trabalho foram próximos aos obtidos por [8], que aplicaram o algoritmo SEBAL para diferentes coberturas da terra para a bacia do Rio Brígida, em Pernambuco, também no bioma caatinga no semiárido do Brasil, que obtiveram uma ET média diária de 4,49 mm/dia.

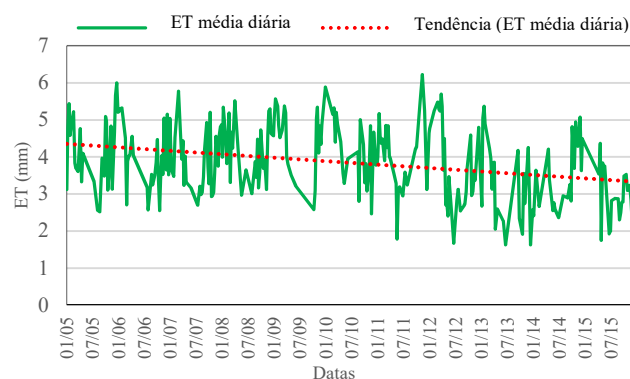


Figura 3. Variabilidade da ET diária média para a BHRI calculada pelo SEBAL automatizado entre 01/01/2005 e 27/12/2015.

A Figura 4 mostra a média da ET média diária para cada ano analisado e o total pluviométrico anual observado na bacia. Observa-se que, entre os anos analisados, apenas em 2005, 2007, 2008 e 2010 foram observados totais pluviométricos superiores à média anual (700 mm), sendo o ano de 2007 o mais chuvoso, com precipitação média de 889 mm. Nos demais anos, foram observados valores inferiores à média da bacia, sendo o ano de 2012 o mais seco com 341 mm.

No ano de 2009, foi identificado o maior valor de ET média diária com 4,53 mm/dia, enquanto [8], que obtiveram ET média de 5,07 mm/dia para o mesmo ano na bacia do Rio Brígida. O menor valor de ET média diária foi obtido em 2015 (3,06 mm/dia), o que representa uma diminuição de 32% em relação aos valores médios de ET entre os anos de 2009 e 2015. Foi identificado na BHRI que o período de 2011 a 2015 apresentou um comportamento pluviométrico inferior à média da bacia, e nesse mesmo período também foi observada uma diminuição mais significativa das médias diárias de ET.

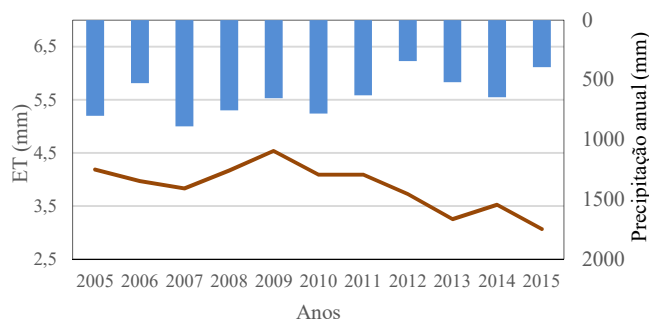


Figura 4. ET diária média para a BHRI calculada pelo SEBAL automatizado.

4. CONCLUSÕES

Este estudo mostrou a aplicação do algoritmo automatizado para todas as etapas na determinação da ET para longas séries temporais de imagens orbitais. Esse algoritmo mostrou-se ser uma ferramenta eficiente para sua aplicação para uma grande quantidade de imagens, tornando uma tarefa menos complexa, com menores incidências de erros e com um tempo de execução bem menor quando comparado ao método tradicional de aplicação do algoritmo automatizado.

As estimativas de ET diária realizadas para a BHRI, no período de 2005 a 2015 evidenciaram uma diminuição dos valores médios de ET para a bacia. Essa diminuição provavelmente pode estar relacionada às mudanças no uso e cobertura do solo observadas para o mesmo período. A utilização do SEBAL automatizado permitiu também a possibilidade de integrar o algoritmo SEBAL com ou para outras estimativas, como por exemplo, estimar a biomassa acumulada. Para isso, se faria necessário apenas inserir as equações necessárias ao modelo já existente no ambiente MATLAB®, abrindo assim, a possibilidade de

automatização de outros modelos utilizando estimativas derivadas do SEBAL.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pela bolsa do primeiro autor, pela bolsa PNPd da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível (CAPES) concedida ao quinto autor, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de Produtividade e Pesquisa do segundo e terceiro autores, e pelo auxílio financeiro ao segundo autor pelo financiamento do Projeto Universal (Proc. 408631/2016-3).

6. REFERÊNCIAS

- [1] Bhattarai, N.; Quackenbush, L. J.; Im, J.; Shaw, S. B. "A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models". *Remote Sensing of Environment*, v. 196, p. 178-192, 2017.
- [2] Wang, C.; Yang, J.; Myint, S. W.; Wang, Z.-H.; Tong, B. "Empirical modeling and spatiotemporal patterns of urban evapotranspiration for the Phoenix metropolitan area, Arizona". *GIScience & Remote Sensing*, v. 53, n. 6, p. 778-792. 2016.
- [3] Tang, R.; Li, Z.-L.; Chen, K.-S.; Jia, Y.; Li, C.; Sun, X. "Spatial-scale effect on the SEBAL model for evapotranspiration estimation using remote sensing data". *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 174-175, p. 28-42. 2013.
- [4] Bilibio, C.; Schellert, C.; Retz, S.; Hensel, O.; Schmeisky, H.; Uteau, D.; Peth, S. "Water balance assessment of different substrates on potash tailings piles using non-weighable lysimeters". *Journal of Environmental Management*, v. 196, p. 633-643. 2017.
- [5] Spiliotopoulos, M.; Holden, N. M.; Loukas, A. "Mapping evapotranspiration coefficients in a temperate maritime climate using the METRIC model and Landsat TM". *Water*, v. 9, n. 1, p.1-23, 2017.
- [6] Bastiaanssen, W. G. M.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Moreno, Y. M. J.; Roerink, G. J.; Van Der Wal, T. "The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation". *Journal of Hydrology*, v. 212-213, p. 213-229, 1998.
- [7] Coelho, V. H. R. "Estimativa da recarga subterrânea em bacia hidrográfica do semiárido pernambucano a partir de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas". Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, 2016.
- [8] Bastiaanssen, 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. doi: 10.1016/S0022-1694(99)00202-4
- [9] Santos, C. A. G.; Silva, R. M.; Silva, A. M.; Brasil Neto, R. M. B. "Estimation of evapotranspiration for different land covers in a Brazilian semi-arid region: A case study of Brígida River basin, Brazil". *Journal of South American Earth Sciences*, v. 74, n. 1, p. 54-66, 2017.