

Implementação preliminar do modelo SEBAL para estimativa da evapotranspiração na Mesorregião do Sul Goiano.

Alexandre da Silva Ferreira¹
Margareth Simões Penello Meirelles^{1,2}

¹ Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ/PGEC
Maracanã, CEP 20550-900, Rio de Janeiro - RJ, Brasil
alexfergeo@yahoo.com.br

² EMBRAPA / Solos
Jardim Botânico, CEP 22460-000, Rio de Janeiro - RJ, Brasil
maggie@eng.uerj.br

Abstract. The need for monitoring of natural phenomena such as evapotranspiration is crucial for planning of human activities, like agriculture. Evapotranspiration is a phenomenon that combines the natural processes of water evaporation and biological processes in animals and plants. In regions like the Greater Region of South State, the dynamics of land use has been so intense with a current problem and especially important given the rapid expansion of production from sugar cane. The use of satellite data from MODIS and the model platform SEBAL directly assists in the measurement of evapotranspiration on a regional scale with consistency and reliability of data. This study aims to carry out an implementation model SEBAL South State in order to preliminarily map the rates of evapotranspiration for this region of the state of Goiás were calculated for the biophysical variables in the model SEBAL implementation, such as NDVI, albedo surface and the IAF and the values of hourly and daily evapotranspiration. The hourly values of evapotranspiration were in the range -0.019 to 0.069 mm.h^{-1} , and the daily evapotranspiration values were in the range 0 to 29.21 mm.d^{-1} . To perform measurements with model SEBAL is necessary to use land use data in more detail looking to improve the processing variables and final reviews.

Palavras-chave: evapotranspiration, remote sensing, SEBAL model, evapotranspiração, sensoriamento remoto, modelo SEBAL.

1. Introdução

A evapotranspiração é considerada um importante fenômeno do ciclo hidrológico e consiste na atuação de dois processos distintos os quais atuam conjuntamente na hidrosfera: a evaporação e a transpiração. Ambos funcionam como transporte hídrico na interface superfície terrestre – atmosfera, por meio da evaporação hídrica da superfície do solo ou de processos fisiológicos animais e vegetais. Segundo Ayoade (2001), o vapor d'água é o componente atmosférico mais importante na determinação do tempo e do clima, embora represente somente 2% da massa total da atmosfera e 4% de seu volume total. A importância das estimativas da evapotranspiração regional é considerada para a resolução de numerosos problemas de ordem ambiental tais como planejamento de áreas agrícolas, na previsão de cheias ou para a construção e operação de reservatórios, dentre outros. As estimativas baseadas em princípios físicos e principalmente equações empíricas são utilizadas como alternativas para suprir a carência de informações obtidas por medidas diretas em estações meteorológicas, principalmente em extensas áreas e de difícil acesso.

O desenvolvimento de sistemas sensores remotos vem sendo utilizados amplamente para estimativas de fenômenos naturais em áreas de grande extensão, a exemplo da evapotranspiração. Com as rápidas mudanças nos usos dos solos, especialmente para fins

agrícolas, o uso do sensoriamento remoto tem-se destacado como uma importante opção de monitoramento e medição de fenômenos naturais, por fornecer informações precisas, com agilidade e facilidade. As potencialidades do sensor MODIS TERRA/AQUA – EOS disponibilizados pela NASA são destacados por Ferraz et al. (2009) por constituírem dados e produtos relacionados à vegetação e ao balanço de energia, com procedimentos de validação sob sistemática correção radiométrica, geométrica, espectral e atmosférica, agregando inteira confiabilidade aos produtos finais.

Nas últimas décadas, a expansão das fronteiras agrícolas no interior do Território brasileiro vem sendo dinamizada, acompanhada de uma inserção cada vez maior do Brasil na economia internacional. As necessidades do mercado externo junto à demanda por produtos agrícolas têm intensificado o crescimento de monoculturas tais como a cana-de-açúcar, em áreas do interior do Brasil pouco exploradas. Segundo Castro et al. (2010), no início do século XXI o crescimento da produção da cana-de-açúcar foi intensificado devido à necessidade da diversificação da matriz energética e ao aumento dos impactos ambientais motivada pela queima de combustíveis fósseis motivam o aumento da produção canavieira, principalmente no Centro-Sul do Território Brasileiro. Os Estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás tornaram alvos desta expansão a partir da consolidação da produção canavieira nos Estados das Regiões Sudeste e Sul.

2. Objetivo

Este estudo objetivou realizar uma primeira tentativa de implementar o modelo *Surface Energy Balance Algorithms for Land* (SEBAL) na Mesorregião Sul do Estado de Goiás, fazendo usos de imagens orbitais do sensor MODIS/AQUA, para estimativas do fenômeno da evapotranspiração.

3. Materiais e métodos

A metodologia de trabalho consistiu na implementação do modelo *Surface Energy Balance Algorithms for Land* (SEBAL) elaborado por Bastiaanssen em 1995. O SEBAL é um algoritmo voltado para o estudo de fluxo de calor e estimativa da evapotranspiração que se notabiliza por fazer poucas relações e suposições empíricas e por fazer uso de dados multiespectrais de satélites complementados com poucas informações de superfície, tais como temperatura do ar e velocidade do vento, que são facilmente obtidas nas estações meteorológicas (Nicácio, 2008). Além disso, o SEBAL descreve a variabilidade espacial de muitas variáveis micrometeorológicas através de funções semi-empíricas, sendo que o algoritmo é aplicável para diversos agrossistemas, como afirma Bastiaanssen *et al.* (1998a).

A área escolhida para realização do presente estudo compreende a Mesorregião Sul do Estado de Goiás, localizada entre os meridianos 47°00' e 53°05' de longitude Oeste e entre os paralelos 15°05' e 19°07' de latitude Sul.

A Mesorregião do Sul Goiano compreende 83 municípios, sendo subdividida em 06 Microrregiões e 04 Regiões de Planejamento, que tem sido cenário de intensas modificações no uso do solo pela expansão agrícola, especialmente pelo crescente desenvolvimento do setor sucroalcooleiro (Figura 1). Destaca-se neste cenário, a Região de planejamento do Sudoeste Goiano onde ocorre uma rápida dinamização na instalação e funcionamento de usinas canavieiras ao longo da última década.

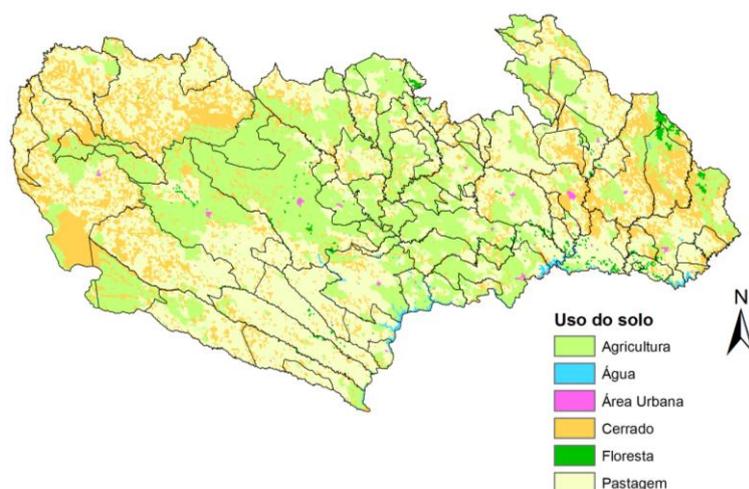


Figura 1: mapa de usos do solo para a Mesorregião do Sul Goiano (Fonte: SIEG, 2010).

O clima é tipicamente tropical com invernos secos e verões chuvosos. O período de estiagem ocorre entre os meses de maio e setembro e o período de chuva ocorre entre os meses de outubro e abril. O índice pluviométrico anual é de 1532 mm para o Estado de Goiás sendo crescentes de Sul para Norte e de Leste para Oeste. Em torno de 95% do total da precipitação anual geralmente ocorre nos meses de dezembro e janeiro. Entre os meses de agosto e setembro ocorrem as maiores médias de temperatura, geralmente em torno dos 34°C e as médias mais baixas são encontradas entre os meses de junho e julho, ficando em torno de 12°C. Os maiores índices de evaporação são medidos no mês de setembro, entre 340 e 360 mm e por outro lado, os valores mais baixos são medidos no mês de setembro, na faixa de 60 a 80 mm (SIEG, 2010).

Os dados multiespectrais para implementação no modelo SEBAL utilizados neste estudo correspondem aos produtos MYD09A1 e MYD11A2 da plataforma orbital MODIS/AQUA referentes ao dia Juliano 065 (06 de março) do ano de 2010. As imagens referentes aos *Tiles* 013 e 012 foram adquiridos através do sítio eletrônico: <http://mrtweb.cr.usgs.gov/> em formato HDF, no sistema de projeção Sinusoidal.

A utilização dos dados MODIS requer o ajustamento dos números digitais de seus pixels. O produto MYD09A1 foi corrigido pelo fator de escala 0.0001 e ao produto MYD11A2 foi aplicado o fator de escala de 0.02. Foram criados mosaicos de cada uma das bandas e o recorte através de um retângulo envolvente compreendido entre os meridianos 47°00' e 53°05' de longitude Oeste e entre os paralelos 15°05' e 19°07' Sul para agilizar o processamento dos dados.

Todo o processo de implementação do modelo SEBAL foi realizado no software Arcgis 9.3 seguindo as propostas metodológicas de Bastiaanssen (2000), Allen et al. (2002) e conforme aplicações já testadas por Andrade (2008) e Nicácio (2008).

O primeiro passo foi o cálculo das variáveis biofísicas, tais como o albedo instantâneo de superfície (α), o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), o índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e o índice de área foliar (IAF). O albedo instantâneo de superfície foi calculado por meio da Equação 1, conforme Andrade (2008).

$$\alpha = 0,160\rho_1 + 0,291\rho_2 + 0,243\rho_3 + 0,116\rho_4 + 0,112\rho_5 + 0,081\rho_7 - 0,0015 \quad (1)$$

Onde, $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_7$ são as bandas de refletâncias do produto MYD09A1.

O NDVI foi obtido através do equacionamento das bandas 01 e 02 do Produto MYD09A1 do MODIS/AQUA (Equação 2).

$$\text{NDVI} = \rho_2 - \rho_1 / \rho_2 + \rho_1 \quad (2)$$

O SAVI também foi obtido pelo equacionamento das bandas 01 e 02 de forma idêntica ao realizado no cálculo do NDVI, porém com um fator de ajuste de fundo de solo (L) igual a 0,5 (Allen et al, 2002) (Equação 3).

$$\text{SAVI} = (1 + L) (\rho_2 - \rho_1) / (L + \rho_2 + \rho_1) \quad (3)$$

Abaixo segue o modo do cálculo do IAF (Equação 4).

$$\text{IAF} = \ln(0,69 - \text{SAVI} / 0,59) / 0,91 \quad (4)$$

A partir dos parâmetros biofísicos foi realizada a implementação do modelo SEBAL para o cálculo dos fluxos de energia por meio da equação de Stefan-Boltzman. Pode-se obter a radiação de onda longa emitida pela superfície ($R_{L\uparrow}$) em W.m^{-2} , conforme a Equação 5.

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (5)$$

Onde, σ equivale a constante de Stefan-Boltzman de valor $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, T_s refer-se a temperatura da superfície em Kelvin, obtida pelo produto LST (MYD11A2) e ε_0 é a emissividade da superfície (Allen et al. 2002). O valor de ε_0 foi obtido através da Equação 6.

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 \text{ IAF} \quad (6)$$

De acordo com as recomendações de Allen et al. (2002), para os pixels com $\text{IAF} \geq 3$ são adotados valores de $\varepsilon_0 = 0,98$ e para corpos d'água com $\text{NDVI} < 0$ e $\alpha < 0,47$ o valor ε_0 adotado deve ser de 0,985.

Em seguida foi estimada a radiação de longa emitida pela atmosfera em direção da superfície terrestre ($R_{L\downarrow}$), em W.m^{-2} , também por meio da equação de Stefan-Boltzman com a Equação 7, sugerida por Allen et al (2002).

$$\varepsilon_a = 0,85 (-\ln\tau_{sw})^{0,09} \quad (7)$$

Onde, τ_{sw} consiste na transmissividade atmosférica para condições de céu claro (Equação 8).

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2.10^5 Z_a \quad (8)$$

Z_a corresponde a altitude em metros que pode ser obtida em estações meteorológicas localizadas na área de estudo ou por meio de modelos digitais de elevação, a exemplo do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

A radiação de onda curta incidente ($R_{S\downarrow}$), em W.m^{-2} corresponde ao fluxo de radiação solar direta e difusa que atinge a superfície terrestre estimada em condições de céu claro conforme Allen et al (2002) (Equação 9).

$$R_{S\downarrow} = G_{SC} \cdot \cos\theta_z \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \quad (9)$$

Onde, G_{SC} corresponde a constante solar de valor 1367 W.m^{-2} , θ_z é o ângulo zenital solar obtido por meio da banda 09 do produto MYD09A1 e d_r é a distância relativa Terra-Sol em unidades astronômicas – UA, obtido pela Equação 10.

$$d_r = (r_0 / r)^2 = 1,000110 + 0,03422\cos\Gamma + 0,001280\text{sen}\Gamma + 0,000719\cos 2\Gamma + 0,000077\text{sen} 2\Gamma \quad (10)$$

Onde, $\Gamma = 360 \cdot (\text{DJ} - 1 / 365)$, medidos em graus.

Os valores referentes ao saldo de radiação para superfície (R_n) medidos em W.m^{-2} foram obtidos por meio da equação abaixo, conforme Allen (2002) propõem (Equação 11).

$$R_n = R_{S\downarrow} - \alpha R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (11)$$

Os valores do fluxo instantâneo de calor no solo (G) medido em W.m^{-2} foram obtidos pela aplicação apresentada por Bastiaanssen (2000) (Equação 12).

$$G = [T_s / \alpha (0,0038 \alpha + 0,0074 \alpha^2) (1 - 0,98 \text{NDVI}^4)] R_n \quad (12)$$

Para este cálculo, os valores de T_s que é a temperatura instantânea de superfície são obtidos através do produto LST (MYD11A2) em graus Celsius. Também são utilizados os valores de albedo de superfície (α) o NDVI calculado para cada pixel. Segundo Allen et al. (2002) são necessárias as correções dos valores de fluxo de calor no solo para corpos d'água cujo $\text{NDVI} < 0$ (Equação 13).

$$G = 0,3R_n \quad (13)$$

Os valores do fluxo de calor sensível instantâneo (H) medidos em W.m^{-2} foram medidos conforme aplicação de Nicácio (2008) e Allen et al. (2002) (Equação 14).

$$H = \rho c_p dT / r_{ah} = \rho c_p (a + b T_s) / r_{ah} \quad (14)$$

Onde, ρ é a densidade do ar úmido ($1,15 \text{ kg.m}^{-3}$), c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($1004 \text{ J.kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), dT é a diferença de temperatura (K) entre duas alturas z_1 e z_2 acima do plano zero de deslocamento e r_{ah} é a resistência aerodinâmica do ar para o transporte de calor medido em s.m^{-1} . Os valores de H podem ser corrigidos por meio do processo que associa a teoria de Monin-Obukhov para avaliar as condições estabilidade da atmosfera, como proposto Allen et al. (2002).

Os valores dos coeficientes a e b são obtidos a partir de pixels “âncoras”, também chamados de pixels quente e frio, selecionados na área de estudo. O pixel “frio” é selecionado em áreas de corpos d'água ou inundada, enquanto o pixel “quente” geralmente é obtido numa área de solo exposto. Para o pixel frio os valores de calor sensível foram considerados zero ($H = 0$), pois uma parte da energia disponível para superfície é utilizada nos processos de evapotranspiração e desta maneira a maior parte do R_n é constituída do fluxo de calor latente (λET). No pixel quente o valor de calor latente foi considerado nulo ($\lambda ET = 0$).

A partir da obtenção de R_n , G e H foi estimado o fluxo de calor latente instantâneo (LE), sendo este um resíduo da equação do balanço de energia. Os valores de R_n , H e G são medidos em W.m^{-2} (Equação 15).

$$LE = R_n - H - G \quad (15)$$

A fração evaporativa (λ) foi estimada pela equação abaixo proposta por Bastiaanssen et al. (1998b) (Equação 16).

$$\lambda = W = LE / (LE + H) = LE / (R_n - G) \quad (16)$$

O fluxo de calor latente foi convertido em valores de evaporação horária (ETh) conforme proposta apresentada por Nicácio (2008) (Equação 17).

$$ETh = 3600 * LE / a \quad (17)$$

Em que, a é o calor latente de vaporização (J. kg^{-1}).

A evapotranspiração diária foi calculada conforme o a fórmula apresentada por Nicácio (2008) (Equação 18).

$$ET_{24h} = 86400. b . R_{n24h} / \lambda \quad (18)$$

Onde b é a fração evaporativa no instante da passagem do satélite.

4. Resultados e Discussão

Na Figura 2 estão representados os mapas referentes ao índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) (A), o albedo de superfície (α) (B) e o índice de área foliar (IAF), para toda a área de estudo.

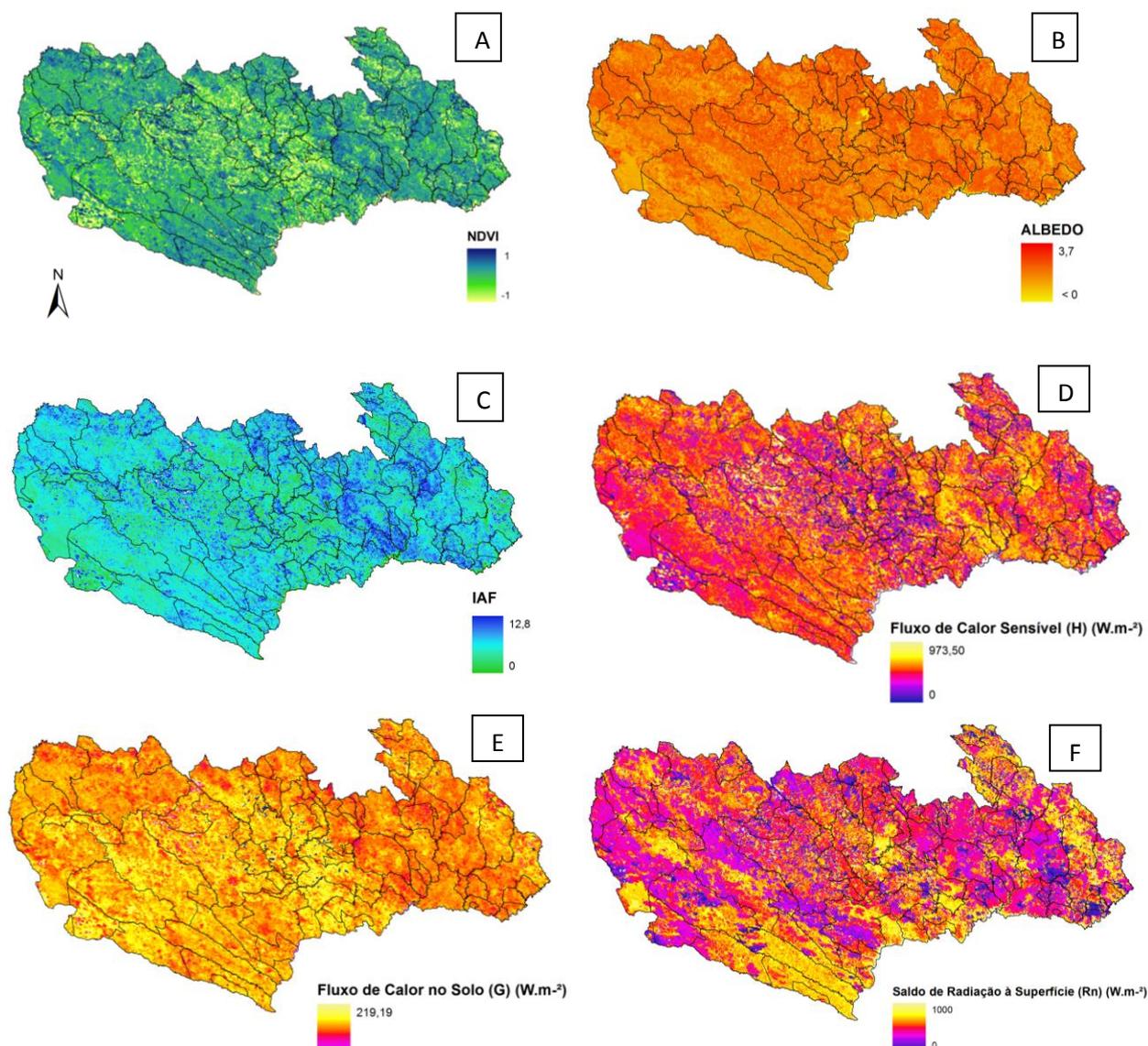


Figura 2: Mapas das variáveis utilizadas para implementação no modelo SEBAL.

O valor médio de NDVI ficou próximo de 0,62, enquanto o de IAF ficou próximo de 0,87 e o valor de albedo esteve próximo de 0,17. Nesta figura também estão os mapas referentes ao fluxo de calor sensível (H), ao fluxo de calor no solo (G) e o saldo de radiação à superfície (Rn), todos medidos em W.m^{-2} . Para estas variáveis foram obtidos valores médios de 672,1 W.m^{-2} para o fluxo de calor sensível, 109, 6 W.m^{-2} para o fluxo de calor no solo e 825,0 W.m^{-2} para o saldo de radiação à superfície.

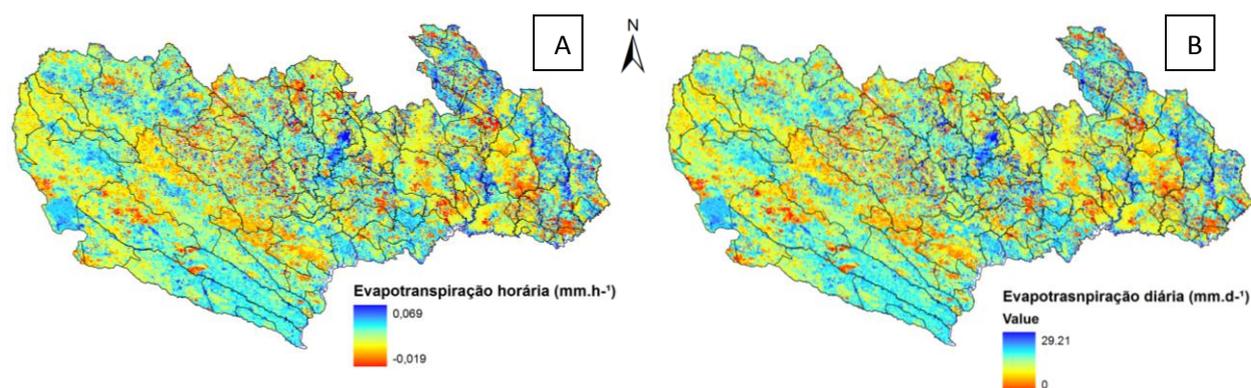


Figura 3: Mapa referente aos índices de evapotranspiração horária (mm.h^{-1}) (A) e evapotranspiração diária (mm.d^{-1}) (B).

A Figura 3 representa os mapas de evapotranspiração horária e diária obtidos por meio do modelo SEBAL. Os valores de evapotranspiração horária variaram entre $-0,019$ a $0,069 \text{ mm.h}^{-1}$, sendo a média em torno de $0,0018 \text{ mm.h}^{-1}$. Os valores de evapotranspiração diária ficaram na faixa de 0 até $29,21 \text{ mm.d}^{-1}$, com média de $1,57 \text{ mm.d}^{-1}$. Ambos os mapas demonstram que as áreas onde predominou maiores índices de evapotranspiração horária e diária foram nas áreas florestadas. Nas áreas de pastagem e cerrados foram obtidos valores de evapotranspiração horária e diária muito próxima.

A implementação do modelo SEBAL requer dados referentes ao uso do solo com maior detalhamento a fim de fornecer maior precisão ao computo das variáveis e para melhorar as análises dos resultados.

5. Conclusões

A implementação do modelo SEBAL requer a associação de dados de uso do solo de maior detalhamento com vista a melhorar as estimativas do modelo SEBAL. Os valores de evapotranspiração estimados pelo modelo SEBAL variaram de $-0,019$ até $0,069 \text{ mm.h}^{-1}$ para os valores horários e de 0 até $29,21 \text{ mm.d}^{-1}$ para os valores diários.

6. Referências Bibliográficas

Allen, R. G., Tasumi, M., Trezza, R., et al., 2002, SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) advanced training and users manual – Idaho implementation, Idaho University, Idaho, USA.

Andrade, R. G., Sedyama, G. C. Bastitella, M., Victoria, D. C., Paz, A. R., Lima, E. P., Nogueira, S. F. Mapeamento de parâmetros biofísicos e da evapotranspiração no Pantanal usando técnicas de sensoriamento remoto. In: 2º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Corumbá, 7-11 novembro, 2009, Embrapa Informática Agropecuária/INPE., Anais... p.695-704 Disponível em: <<http://www.geopantanal2009.cnptia.embrapa.br/cd/pdf/p105.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2010.

Ayoade, J. O. **Introdução a Climatologia para os Trópicos**. Tradução de Maria Juraci Zani dos Santos; revisão de Suely Bastos; Coordenação editorial de Antônio Christofolletti. – 6ª Ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. 332p.

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

Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum, H., Wang, J., *et al.*, 1998b, A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation, **Journal of Hydrology**, v. 212 – 213, p. 213 – 229.

Castro, S. S., Abdala, K., Silva, A. A., Bôrges, V. M. S. A expansão da cana-de-açúcar no cerrado e no Estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 30, n. 1, p. 171-191, jan./jun. 2010.

Ferraz, P. D., Meirelles, S. P., Jobágyy, E. Jonathan, M. Coutinho, H. L. C. Utilização de dados MODIS e modelo SEBAL para a estimativa da perda de água por evapotranspiração: Uma Proposição para o monitoramento do impacto da expansão da cultura canavieira na dinâmica hídrica regional. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14, 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos, p. 175-182. Disponível em: <http://martemarte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.12.18/doc/175-182.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2010.

Nicácio, R. M., 2008, Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do rio São Francisco [Rio de Janeiro] 2008 XVII, 320 p. (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, 2008) Tese -Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

Sistema Estadual de Estatística e de Informações Geográficas de Goiás (SIEG). Disponível em: <http://www.sieg.go.gov.br/> Acesso em: 08 de agosto de 2010.