

Variabilidade dos fluxos de calor sensível e latente em áreas de cerrado *sensu stricto*

Anderson Luis Ruhoff¹
Robinson Isaac Negrón-Juárez²
Ramon Morais Freitas³
Walter Collischonn¹
Humberto Ribeiro da Rocha⁴

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS
Caixa Postal 15029 – 91501-970 – Porto Alegre – RS, Brasil
anderson.ruhoff@ufrgs.br, collischonn@iph.ufrgs.br

² Departamento de Ecologia e Biologia Evolucionária – Universidade de Tulane
70118-5698 – Nova Orleans – LA, EUA
rjuarez@tulane.edu

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 – 12245-970 – São José dos Campos – SP, Brasil
ramon@ltid.inpe.br

³ Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG/USP
CEP 05508-090 – São Paulo – SP, Brasil
humberto@model.iag.usp.br

Abstract – Evapotranspiration is one of the most important regulator factors for hydric availability, climate and weather, both in global and local scale. The constraints due local measuring motivated the development of techniques involving remote sensing information to estimate evapotranspiration in large areas. The objective of this work was to evaluate the accuracy of SEBAL algorithm in the estimation of the components of surface energy balance equation. 28 images of the Terra/MODIS sensor were used to test the algorithm. The estimated data using SEBAL was analyzed by comparison with local measures, obtained by correlation of turbulent vortexes. The results indicate that the methodology used in this paper presented variations of 57% in latent heat fluxes and overestimation 1,6 mm/dia the evapotranspiration in cerrado *sensu stricto* areas. The low spatial resolution of the images could have contributed significantly in the increment of the error of the obtained values, because of the various types of land use and land cover contained in the image resolution cell. Nevertheless, the preliminary results confirm the Terra/MODIS sensor potential in the estimation of instantaneous evapotranspiration.

Keywords: evapotranspiration, energy fluxes, SEBAL, hydrological model, MODIS.

1. Introdução

As limitações impostas por medidas pontuais de evapotranspiração motivaram o desenvolvimento do uso de dados obtidos por sensoriamento remoto para a determinação dos fluxos de calor sensível e latente e da evapotranspiração em grandes áreas. Alguns algoritmos têm sido desenvolvidos nos últimos anos, dentre os quais se destaca o algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*; Bastiaanssen *et al.*, 1998) que tem como objetivo determinar a evapotranspiração, através do balanço completo da radiação e da energia sobre a superfície terrestre, utilizando dados de sensoriamento remoto e alguns dados complementares de superfície, como velocidade do vento e temperatura do ar.

O objetivo desse trabalho consiste em avaliar as estimativas do saldo de radiação e dos fluxos de calor sensível e latente a partir de produtos diários e 16-dias do sensor Terra/MODIS em uma área da Bacia do Rio Grande, SP, caracterizada por remanescentes de cerrado *sensu stricto* e cultivos de cana-de-açúcar. A validação dos resultados foi realizada a partir de dados medidos pelo sistema de correlação de vórtices turbulentos.

O presente trabalho insere-se em um objetivo maior do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que consiste na calibração do modelo hidrológico MGB-IPH, utilizando-se estimativas distribuídas de evapotranspiração. O modelo foi desenvolvido para ser aplicado em grandes bacias, sendo composto por módulos de balanço de água no solo, evapotranspiração, escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo.

2. Área de estudo

A estimativa da evapotranspiração foi realizada em uma área compreendida entre as coordenadas de 20°30' e 22°30' de latitude sul e 46°30' e 48°30' de longitude oeste. A área localiza-se no estado de São Paulo e é caracterizada pela intensa produção de cana-de-açúcar (1) e pelos remanescentes florestais de cerrado *sensu stricto* (2) (figura 1).

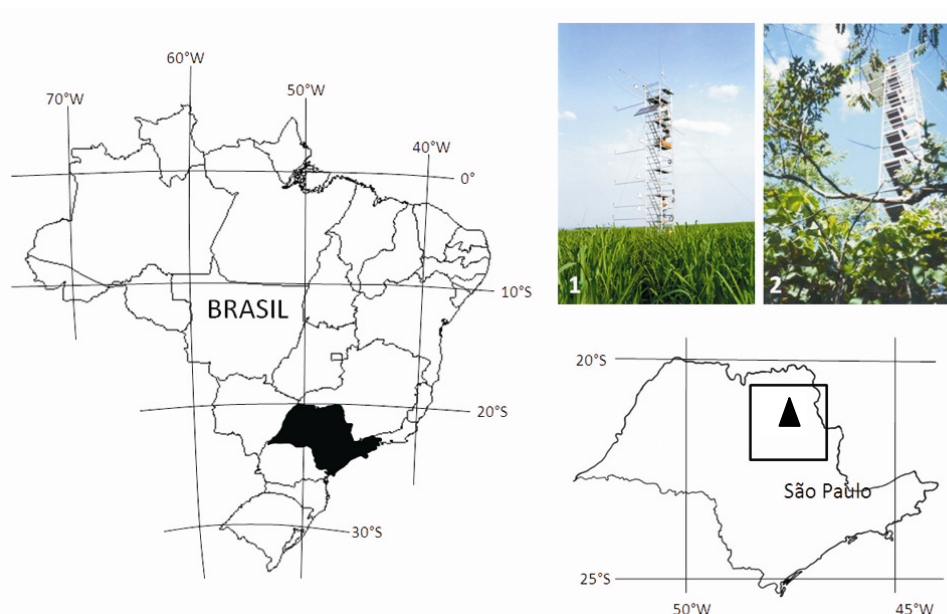


Figura 1 – Localização da área de estudo e do sítio de monitoramento dos fluxos de vórtices turbulentos em áreas de cerrado *sensu stricto*.

Os fluxos de calor latente (LE) e calor sensível (H) foram medidos a uma altura de 22 metros, através de um sistema de covariância de vórtices turbulentos. O sistema é composto por um analisador de gás infravermelho (IRGA-LICor 6262) e de um anemômetro ultra-sônico tridimensional (Gill-1012R2A), onde os fluxos turbulentos são medidos a cada 30 minutos através das flutuações medidas a 10 Hz. Os sensores de saldo de radiação e fluxo de calor no solo ($REBS$, *Radiation Energy Budget Systems*), conectados a um sistema de aquisição de dados (Campbell-CR10X), obtêm dados a cada 10 segundos, armazenando as médias a cada 10 minutos. Juárez (2004) apresenta descrições detalhadas dos processos de medição dos fluxos turbulentos e de energia na área de estudo.

3. Balanço de energia em superfície pelo modelo SEBAL

A descrição completa do algoritmo pode ser obtida em Allen *et al.* (2002). Ruhoff *et al.* (2008) apresentam a metodologia completa utilizada neste trabalho. O fluxo de calor latente (LE , $W.m^{-2}$) foi estimado como o resíduo da equação do balanço de energia, contabilizando-se a diferença entre o saldo de radiação (R_n , $W.m^{-2}$), o fluxo de calor no solo (G , $W.m^{-2}$) e o fluxo de calor sensível (H , $W.m^{-2}$). A equação 1 apresenta o balanço de energia do SEBAL.

$$R_n - LE - G - H = 0 \quad (1)$$

O saldo de radiação foi determinado de acordo com a equação 2.

$$R_n = R_{s\downarrow}(1 - \alpha) + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

onde $R_{s\downarrow}$ corresponde a radiação de ondas curtas incidentes, $R_{L\downarrow}$ corresponde radiação de ondas longas incidentes, $R_{L\uparrow}$ corresponde radiação de ondas longas emitidas, α corresponde ao albedo de superfície e ε_0 corresponde a emissividade da superfície. O albedo de superfície é estimado de acordo com a equação 6, proposto por Tasumi *et al.* (2008).

$$\alpha = \sum_{b=1}^7 [\rho_b \omega_b] \quad (3)$$

onde ρ_b corresponde a reflectância de superfície para sete bandas espectrais do sensor MODIS, enquanto ω_b corresponde ao coeficiente que representa a fração de radiação solar em direção a superfície que ocorre em cada comprimento de onda de cada uma das sete bandas espectrais do sensor MODIS.

O fluxo de calor no solo pode ser obtido segundo uma equação empírica desenvolvida por Bastiaanssen *et al.* (1998), de acordo com a equação 4.

$$\frac{G}{R_n} = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1 - 0,98 * NDVI^4) \right] \quad (4)$$

onde T_s corresponde a temperatura de superfície (°C), $NDVI$ corresponde ao índice de vegetação por diferença normalizada, obtido do produto MOD13 – 16 Days Vegetation Indices, do sensor Terra/MODIS.

O fluxo de calor sensível é determinado de acordo com a equação 5.

$$H = \frac{\rho_a c_p * dT}{R_{ah}} \quad (5)$$

onde ρ_a corresponde a massa específica do ar (kg.m^{-3}) e C_p corresponde ao calor específico do ar à pressão constante ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), R_{ah} corresponde a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (s.m^{-1}) e dT corresponde ao gradiente de temperatura, ou seja, a diferença entre a temperatura da superfície (T_s em uma altura Z_1) e a temperatura do ar (T_a em uma altura Z_2).

No algoritmo SEBAL, o gradiente de temperatura dT é determinado por meio de um processo de calibração interna para condições extremas, consistindo na seleção de dois pixels âncoras, o “pixel quente” e o “pixel frio”. O “pixel frio” é selecionado sobre áreas bem irrigadas, em condições ideais de evapotranspiração, tais como lavouras agrícolas irrigadas por pivô central ou grandes superfícies de água, onde o fluxo de calor sensível é considerado nulo. O “pixel quente” é selecionado sobre áreas sem vegetação fotossinteticamente ativa e sem umidade, como solos desnudos, em condições críticas de evapotranspiração, assumindo que o fluxo de calor latente é considerado nulo nessas áreas (Bastiaanssen *et al.*, 1998). Desse modo, é construída uma relação linear entre a temperatura de superfície e o gradiente de temperatura.

A primeira estimativa do fluxo de calor sensível é realizada sob condições de neutralidade atmosférica. Considerando que essas condições exercem um efeito expressivo sobre a resistência aerodinâmica, há necessidade de assimilar os efeitos da estabilidade atmosférica, através do comprimento de Monin-Obukov (L). A obtenção do fluxo de calor sensível com correção de estabilidade atmosférica no SEBAL é realizado através de um processo iterativo,

que se encerra com a convergência numérica da resistência aerodinâmica e do gradiente de temperatura.

A determinação da evapotranspiração diária foi realizada de acordo com a proposta de Bisht *et al.* (2005), com base em estudos de Lagouarde e Brunet (1983), desenvolveram uma proposta de obtenção do ciclo diurno do saldo de radiação ($R_{n(t)}$) e do saldo médio de radiação diária ($R_{n(day)}$), a partir de uma função senoidal (figura 2).

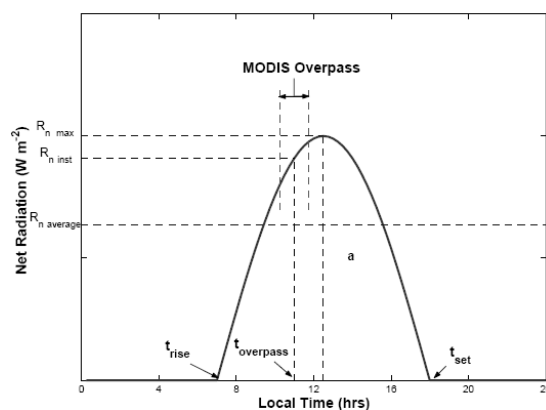


Figura 2 – Modelo de estimativa média diária do saldo de radiação. Fonte: Bisht *et al.* (2005).

O modelo senoidal de estimativa média diária do saldo de radiação a partir de dados do sensor MODIS é dado pela equação 6.

$$R_{n(day)} = \frac{2 * R_{n(MODIS\ overpass)}}{\pi * \text{sen} \left[\left(\frac{t_{overpass} - t_{rise}}{t_{set} - t_{rise}} \right) * \pi \right]} \quad (6)$$

onde $R_{n(MODIS\ overpass)}$ corresponde ao saldo instantâneo de radiação (W m^{-2}), $t_{overpass}$ corresponde ao instante de aquisição da imagem pelo sensor MODIS (h), t_{set} corresponde ao instante do por do sol (h) e t_{rise} corresponde ao instante do nascer do sol (h).

6. Resultados e discussões

O ciclo sazonal instantâneo do saldo de radiação (aproximadamente 11h) estimado com base no algoritmo SEBAL apresentou boa correlação em áreas de cerrado *sensu stricto* (figura 3a), com dados medidos pelo sistema REBS. Observou-se uma sazonalidade bem definida, de acordo com o processo de incidência de radiação solar sobre a superfície terrestre e coincidente com os solstícios de verão e inverno, com máximos durante a estação chuvosa e mínimos durante a estação seca.

Para áreas de cerrado, os dados estimados variaram entre 765 e 448 W.m^{-2} , enquanto os dados observados variaram entre 797 e 343 W.m^{-2} . O algoritmo SEBAL apresentou variações de 10% no saldo de radiação, quando comparado a dados observado, correspondendo a 57 W.m^{-2} . O erro da estimativa do saldo de radiação apresentou variações entre 0,5 e 37%, ou seja, o erro absoluto variou entre menos de 2 a 120 W.m^{-2} , com desvio-padrão de 10%. Os maiores erros na estimativa do saldo de radiação estão ligados a dias parcialmente nublados ou causados possivelmente pela presença de nuvens no local, que não foram detectadas e corrigidas pela máscara utilizada nos produtos MOD11 (Wan *et al.*, 2002).

Os valores instantâneos dos fluxos de calor no solo observados variaram entre 24 e 8 W.m^{-2} nas estações chuvosa e seca, respectivamente. Os dados estimados apresentaram correlação sazonal com os dados observados, com variações entre 28 e 69 W.m^{-2} em áreas de cerrado, nas estações chuvosa e seca, respectivamente. Na estimativa dos fluxos de calor no

so, os valores estimados superestimaram em mais de 200% os valores observados. Em termos absolutos, o fluxo de calor no solo foi superestimado em média 35 W.m^{-2} , com desvio-padrão de 12 W.m^{-2} .

Os fluxos instantâneos de calor sensível estimados pelo algoritmo SEBAL apresentam erros médios de aproximadamente 24% (figura 3b), quando comparados com dados instantâneos medidos pelo sistema de correlação de vórtices turbulentos sob condições instáveis (para $Rn > 150 \text{ W.m}^{-2}$). O desvio-padrão do erro foi de 18%. Em valores absolutos, o erro médio foi de aproximadamente 52 W.m^{-2} , enquanto que o desvio-padrão do erro foi de 45 W.m^{-2} .

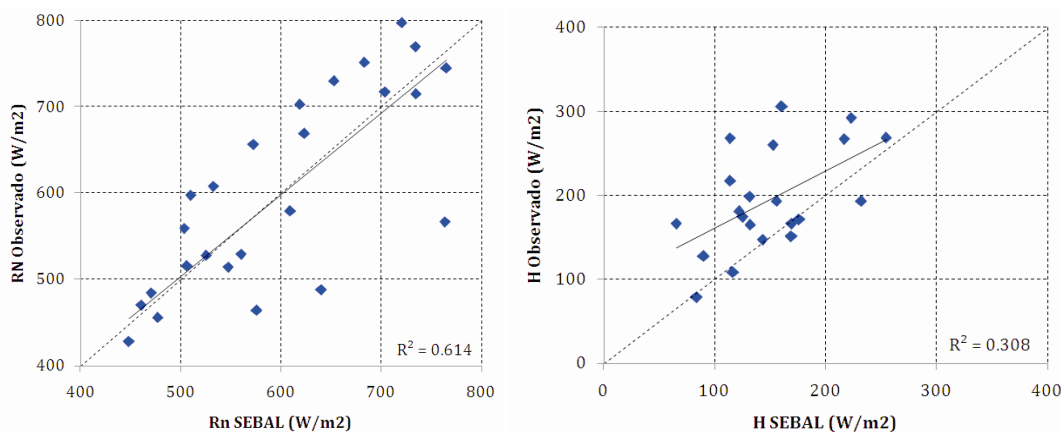


Figura 3 – Comparação do saldo de radiação (a) e do fluxo de calor sensível (b) observados e estimados pelo algoritmo SEBAL em áreas de cerrado *sensu stricto*, para o ano de 2001.

O fluxo de calor sensível instantâneo estimado não apresentou sazonalidade bem definida. A média estimada foi de 149 W.m^{-2} , variando entre 65 e 231 W.m^{-2} , enquanto a média observada foi de 195 W.m^{-2} , variando entre 78 e 292 W.m^{-2} . Juárez (2004) comenta que o fluxo de calor sensível não é apenas controlado pelo saldo de radiação, mas também pela cobertura do dossel. A senescência, causada principalmente pela baixa oferta de umidade na estação seca, reduz a atividade fotossintética da cultura. Diminuindo-se o índice de vegetação, uma maior quantidade de energia fica disponível para ser convertida em fluxo de calor sensível. Dessa forma, os valores máximos de calor sensível aparecem em agosto e setembro (variações estimadas entre 175 e 290 W.m^{-2}), enquanto os valores mínimos aparecem em março e abril (variações estimadas entre 120 e 190 W.m^{-2} e variações observadas entre 95 e 160 W.m^{-2}). A influência da alternância de estações produz consideráveis sobre a vegetação, alterando a rugosidade e a resistência da superfície, modificando o particionamento da energia disponível em calor e vapor d'água.

O fluxo de calor latente apresenta um padrão sazonal bem definido, no qual os máximos ocorrem na estação chuvosa, enquanto os mínimos ocorrem na estação seca. Dessa forma, os dados estimados pelo algoritmo SEBAL representaram de maneira eficiente a sazonalidade. A estimativa do fluxo de calor latente variou entre 518 e 298 W.m^{-2} , enquanto os dados observados variaram entre 491 e 102 W.m^{-2} , nas estações chuvosa e seca, respectivamente. O erro médio da estimativa foi de 58% quando comparado aos dados observados, com um desvio-padrão de 56%, correspondendo a aproximadamente 110 W.m^{-2} (figura 4a).

O resultado do fechamento do balanço de energia, uma comparação dos fluxos turbulentos estimados pelo algoritmo SEBAL com as medidas de Rn e G obtidas pelo sistema REBS, mostra uma subestimativa de aproximadamente 9%, correspondendo a 57 W.m^{-2} , com um coeficiente de determinação de 0,85 (figura 4b).

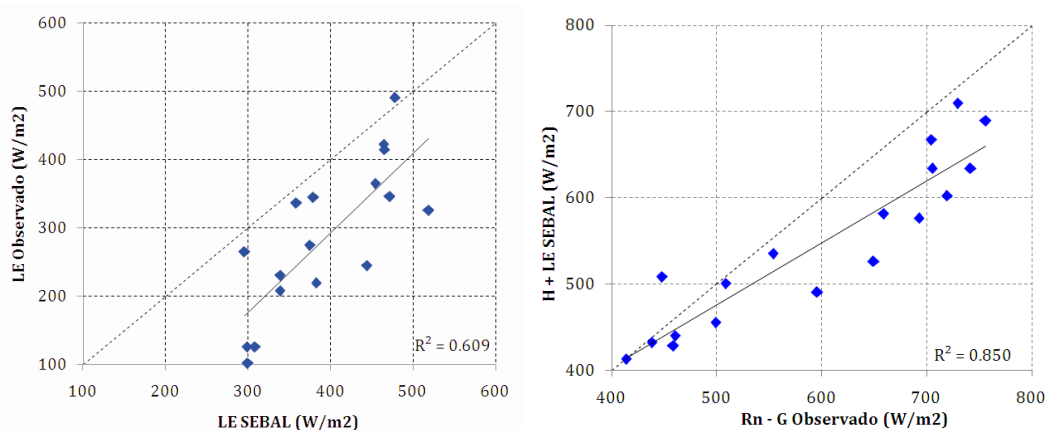


Figura 4 – Comparação do fluxo de calor latente (a) observado e estimado e fechamento do balanço de energia (b) em áreas de cerrado *sensu stricto*, para o ano de 2001.

Como as medidas de radiação líquida, fluxo de calor do solo, fluxo de calor sensível e latente são realizadas por métodos diferentes, o fechamento do balanço de energia indica se está havendo concordância entre as medidas. Nem sempre é possível encontrar resultado satisfatório, isto porque podem ocorrer erros de medidas especialmente os que usam a técnica de covariância de vórtices, que normalmente subestimam os fluxos turbulentos, assim como as diferentes camadas em que são colocados o sensor de radiação líquida (alguns metros acima da superfície) e o de fluxo de calor do solo (alguns centímetros abaixo da superfície), e ainda a heterogeneidade da superfície (Culf *et al.*, 2004).

A estimativa da evapotranspiração diária (figura 5), utilizando-se um modelo senoidal de integração do saldo de radiação, permitiu observar que os dados de evapotranspiração diária estimados variaram entre 7,4 (na estação chuvosa) e 1,6 mm dia⁻¹ (na estação amena e seca), enquanto os dados observados variaram entre 5,00 (na estação chuvosa) e 0,61 mm dia⁻¹ (na estação seca). A estimativa da evapotranspiração diária apresentou resultados que superestimaram os dados observados em aproximadamente 1,5 mm dia⁻¹. Em alguns casos isolados, o erro absoluto foi superior a 2,5 mm.dia⁻¹. Verificou-se posteriormente, que esses erros estão associados a dias parcialmente nublados, em que ocorreu significativa variação do saldo de radiação ao longo do dia. Portanto, em casos em que o saldo de radiação apresenta um padrão senoidal de distribuição, os erros de estimativa da evapotranspiração diária tendem a ser reduzidos.

7. Considerações finais

O erro médio dos termos da equação do balanço de energia estimados com imagens obtidas pelo sensor Terra/MODIS estão coerentes com a literatura científica. Autores como French *et al.* (2005) e Jacob *et al.* (2002), obtiveram resultados muito semelhantes. Jacob *et al.* (2002) observaram variações superiores a 33% (aproximadamente 85 W.m⁻²), no fluxo de calor latente em culturas de alfafa, trigo e girassol, quando comparados com dados obtidos por razão de Bowen. French *et al.* (2005) encontraram variações de 89 W.m⁻² no fluxo de calor latente em uma região agrícola, quando comparado com medidas obtidas pelo sistema de correlações de vórtices turbulentos. A baixa resolução espacial dos dados de entrada no algoritmo (variações de 250 metros a 1 quilometro) pode ter contribuído significativamente no acréscimo do erro das estimativas instantâneas, uma vez que dentro de cada pixel estão contidos diversos tipos de usos e cobertura da terra. Porém, a alta sensibilidade radiométrica em 36 bandas espectrais, a alta resolução temporal (1 ou 2 dias), além das correções geométricas e atmosféricas dos dados Terra/MODIS confirmam o potencial do sensor na estimativa da evapotranspiração instantânea.

A partir dos resultados obtidos, corroborados por vários autores que aplicaram o algoritmo SEBAL em distintas culturas e usos da terra, conclui-se que o modelo não está restrito a áreas irrigadas (para as quais foi inicialmente desenvolvido), mas pode ser aplicado a uma extensa gama de culturas agrícolas e usos e cobertura da terra.

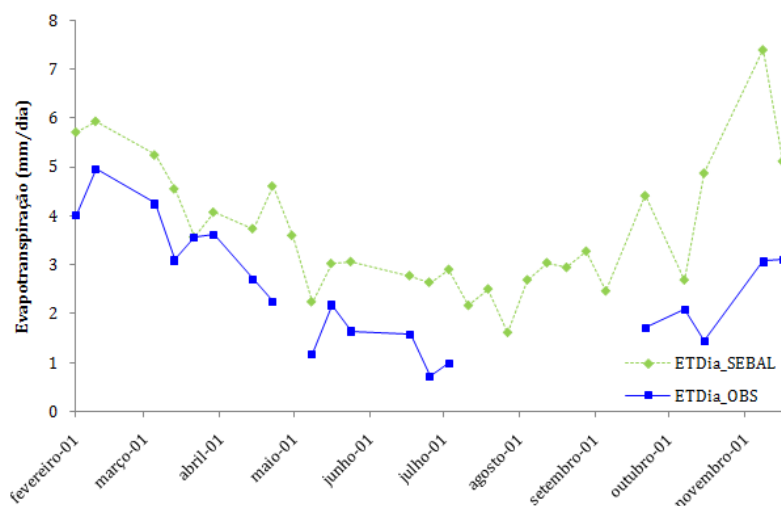


Figura 5 – Estimativa de evapotranspiração diária em áreas de cerrado *sensu stricto*, para o ano de 2001.

Referências bibliográficas

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and drainage paper FAO-56. Water Resources, Development and Management Service, Roma.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. M. (1998). *A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL)*. 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, v. 212–213, n. 1-4, p. 198-212.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; ZWART, S. J. (2007). *SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems*. *Agricultural water management*, v. 89, p. 287-296.
- BISHT, G., VENTURINIA, V., ISLAM, S., JIANG, L. (2005). *Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days*. *Remote Sensing of Environment*, v. 97, p. 52-67.
- CULF, A.D., FOKEN, T., GASH, J.H.C. (2004). *The energy balance closure problem, in: vegetation, water, humans and the climate. A new perspective on an interactive system*. Berlin: Springer, p.159-166.
- DINGMAN, S.L. (2002). *Physical Hydrology*. Prentice Hall.
- FRENCH, A.N., JACOB, F., ANDERSON, M.C., KUSTAS, W.P., TIMMERMANS, W., GIESKE, A., SU, Z., SU, H., McCABE, M.F., LI, F., PRUEGER, J., BRUNSELL, N. (2005). *Surface energy fluxes with the advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) at the Iowa 2002 SMACEX site (USA)*. *Remote Sensing of Environment*, v. 99, p. 55-65.
- HEMAKUMARA, H. M.; CHANDRAPALA, L.; MOENE, A. F. (2003). *Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillometer*. *Agricultural water management*, v. 58, p. 109-122.
- JACOB, F., OLIOSSO, A., GU, X., SU, Z., SEGUIN, B. (2002). *Mapping surface fluxes using airborne visible, near infrared, thermal infrared remote sensing and a spatialized surface energy balance model*. *Agronomie*, v. 22, p. 669-680.

- JUÁREZ, R.I.N. (2004). *Variabilidade climática regional e controle da vegetação no sudeste: Um estudo de observações sobre cerrado e cana de açúcar e modelagem numérica da atmosfera*. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo. São Paulo.
- MENDONÇA, J.C. (2007). *Estimação da evapotranspiração regional utilizando imagens digitais orbitais na região norte fluminense*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes.
- RUHOFF, A.L.; COLLISCHONN, W.; FREITAS, R.M.; JUÁREZ, R.I.N.; ROCHA, H.R. 2008. *Estimativa da sazonalidade da evapotranspiração em plantação de cana-de-açúcar (saccharum sp.) a partir de dados do sensor Terra/MODIS*. II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Rio de Janeiro: ABRH.
- TASUMI, M.; TREZZA, R.; ALLEN, R.G.; WRIGHT, J.L. (2008). *Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S.* Irrigation and Drainage Systems, v. 19, p. 355–376.
- WAN, Z., ZHANG, Y.; ZHANG, Q.; LI, Z. L.; (2002). *Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data*. Remote Sensing of Environment, v. 83, p. 163–180.