

Aplicação do algoritmo SEBAL e imagens MODIS para estimativa do fluxo do calor do solo (G) na região Norte Fluminense, RJ, Brasil

José Carlos Mendonça¹
Romísio Geraldo Bouhide André²
Elias Fernandes de Sousa³
Bernardo Barbosa da Silva⁴

¹Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF/CCT/LAMET
Rod. Amaral Peixoto KM 163, Av. Brannand s/n, Imboassica
CEP: 27925-310, Macaé, RJ, Brasil
mendonca@uenf.br

²Instituto Nacional de Meteorologia - INMET/MARA.
Eixo Monumental, Via S1, Sudoeste
CEP: 70.680-900, Brasília, DF, Brasil
romisio.andre@inmet.gov.br

³Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF/CCTA/LEAG
Av. Alberto Lamego, 2000 – Pq. Califórnia
CEP: 28000-000, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil
efs@uenf.br

⁴Universidade Federal de Campina Grande – UFCG/DCA
Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó
CEP: 58109-970, Campina Grande, PB, Brasil
bernardo@dca.ufcg.edu.br

Abstract: In this work orbital images of sensor MODIS and techniques of remote sensing were used to estimate the flow of the heat of the soil (G) in the Fluminense North region, RJ, Brazil. The measurement in the surface were accomplished through Hukseflux Soil Heat Flux (HFP01) installed in busy agricultural areas with sugarcane and with green dwarfish coconut tree and estimates through the methodology contained in the algorithm Surface Energy Balances Algorithm for Land - "SEBAL". Values of the thermal conductivity of the soil were measured and dear for adjustments using the equation proposed by Kustas et al. (2000). Through the obtained results it can be concluded that the punctual values of the thermal conductivity of the soil used in the proposed methodology of Kustas et al (2000) they were adjusted satisfactorily in both monitored areas. It can be ended although the dear values for the orbital images represented the space variability of the flow of the heat satisfactorily in the soil in the study area, but they overestimated the measured values on the busy area with sugarcane and they underestimated the measured ones in the area with green dwarfish coconut tree. The methodology contained in SEBAL needs to be adjust to improve its performance.

Palavras-chave remote sensing, MODIS, soil flux, SEBAL

1. Introdução

O solo funciona como uma espécie de reservatório de calor que libera ou armazena energia em escala diária, sazonal e anual. O solo aquece e resfria a partir do balanço de energia na interface do solo-atmosfera, o que resulta na propagação de uma onda de calor, por condução, para as camadas inferiores do solo. Da mesma forma é transferido calor para a atmosfera por condução e principalmente por convecção.

Para quantificar esse trânsito de energia no solo, faz-se uso de fluxímetros. Contudo, em função do custo de aquisição e dispêndio operacional, essas medidas são efetuadas em estudos específicos e de curta duração, não existindo, até o momento, segundo Azevedo e

Galvani (2003), séries longas de observação direta dessa grandeza. Uma maneira indireta de conhecer este fluxo de energia consiste em medir a temperatura do solo, com uso de geotermômetros, em diferentes profundidades.

O conhecimento da variação horária, diária, estacional e anual da temperatura do solo é fundamental para regiões e épocas do ano nas quais sua variação possa inibir ou prejudicar o desenvolvimento do sistema radicular das culturas. A temperatura do solo é um dos fatores determinantes da velocidade de germinação das sementes e de desenvolvimento das plântulas, sendo sua influência maior nos sub períodos de semeadura-emergência e crescimento inicial das plantas. Nestes períodos, tendem a ocorrer acentuadas amplitudes térmicas diárias, principalmente próximas à superfície do solo, justamente pela falta de cobertura (Schneider, 1993).

O fluxo do calor no solo é basicamente obtido por medidas próximas à superfície, ou estimado empiricamente, podendo ser uma função de índices de vegetação, da temperatura e do albedo da superfície. Pode-se citar os trabalhos de Bastiaanssen (1995), Kustas e Norman (1990), Roerink e Menenti (2000) e Yunhao et al. (2003), que avaliaram o fluxo de calor no solo com medições de superfície e através de sensoriamento remoto. Em geral, esses trabalhos sugerem que medidas de campo em diferentes tipos de superfícies sejam realizadas, a fim de testar a universalidade da relação proposta.

Esse trabalho teve por objetivo utilizar imagens orbitais e técnicas de sensoriamento remoto para estimar o fluxo do calor do solo (G) na região Norte Fluminense, RJ, Brasil

2. Metodologia de Trabalho

Para a elaboração deste trabalho foram utilizados os produtos MOD09 e MYD09 (Reflectância de Superfície - GHK e GQK) e MOD11 e MYD11 (Temperatura de Superfície) referentes a 24 cenas sobre o “tile” h14/v11 imageadas pelos sensores MODIS/Terra e MODIS/Água, nos dias de ordem do ano (“Julianos”) 218, 227, 230, 241, 255, 285, 320 e 339 do ano de 2005 e 15, 36, 48, 63, 79, 102, 116, 139, 166, 186, 189, 190, 191, 200, 201, 205, 208 e 221 do ano de 2006. Esses dias foram selecionados por não apresentarem cobertura de nuvens sobre a área, ou seja, serem dias de céu claro.

As imagens foram obtidas junto ao Land Processes Distributed Active Archive Center (LP-DAAC) da National Aeronautics and Space Administration (NASA) pelo portal <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/> e foram tratadas e reordenadas para a resolução espacial de 250 m utilizando-se a ferramenta MODIS Reprojection Tool (MRT), obtida gratuitamente no portal <http://edcdaac.usgs.gov/landdaac/tools/modis/index.asp>.

Para os empilhamentos, composições, recortes e álgebras das imagens utilizou-se o software Erdas Image, Versão 8.7. Os mapas temáticos foram gerados pelo ArcGIS 9,0.

Na Figura 1 é apresentado o fluxograma do Surface Energy Balance Algorithm for Land – “SEBAL” para a obtenção do fluxo do calor do solo (G)

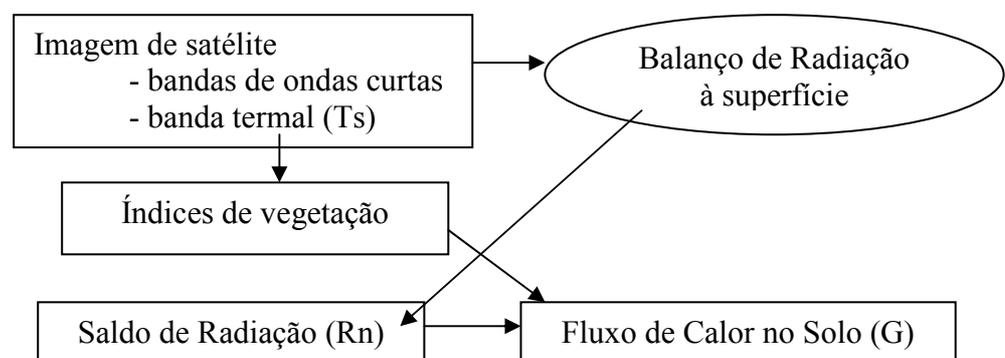


Figura 1: Fluxograma do SEBAL adaptado à imagens MODIS até a obtenção do fluxo do calor do solo (G)

Os dados de superfície foram coletados em duas estações micrometeorológicas pertencentes à Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF e instaladas sobre áreas agrícolas ocupadas por cultivos de cana-de-açúcar (coordenadas: 21° 43' 21,8" S e 41° 24' 26,1" O) e coqueiro-anão-verde (coordenadas 21° 48' 31,2" S e 41° 10' 46,2" O), que contavam com três fluxímetros HFP01SC-L, da Hukseflux em cada estação. Os dados foram coletados a cada minuto e armazenados em valores médios de 15 min por um coletor de dados (datalogger) CR21X, da Campbell Scientific. As coordenadas estão referidas ao Datum WGS 84 – zona 24, sendo a altitude média local de 11 m.

O fluxo de calor no solo foi obtido no SEBAL segundo equação desenvolvida por Bastiaanssen (1995), qual seja:

$$G/R_n = T_s/\alpha \cdot (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1 - 0,98 NDVI^4) \quad (1)$$

onde: T_s é a temperatura da superfície, α o albedo de superfície, NDVI o índice de vegetação da diferença normalizada e R_n , o saldo de radiação.

Os resultados obtidos pela equação 1 foram comparados com valores medidos em fluxímetros e também com valores estimados pela Eq. 2 (Kustas et al. 2000):

$$G = k \frac{\Delta T}{\Delta h} \quad (2)$$

onde: k é a condutividade térmica do solo, função da umidade e da densidade do solo e $\Delta T/\Delta h$ é o gradiente de temperatura na camada superficial do solo.

3. Resultados e Discussão

Inicialmente avaliaram-se os valores do fluxo de calor no solo medido pelos fluxímetros com valores estimados pela Eq. 1 para as áreas cultivadas com cana-de-açúcar e com coqueiro anão.

Na área da cana foi utilizado o valor unitário para a condutividade térmica do solo (K) e, posteriormente, estimou-se o valor de K pela razão entre os valores medidos e estimados. Através de uma amostra de 11600 observações, obteve-se um valor de $K = 0,76$.

Na Figura 2 é apresentado o gráfico de correlação entre os valores do fluxo do calor no solo (G) medidos e estimados pela equação Eq. 2 utilizando-se o valor da condutividade térmica do solo $K = 0,76$, em $W m^{-2}$.

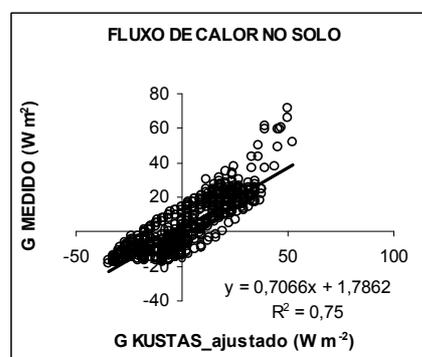


Figura 2 - Gráfico de correlação do fluxo de calor no solo (G) medido e estimado utilizando-se o valor da condutividade térmica do solo $K = 0,76$, sob solo cultivado com a cultura da cana-de-açúcar.

Na Figura 3, é apresentado o gráfico do ciclo diário dos valores medidos e estimados do fluxo do calor no solo (G) pela Eq. 2, utilizando-se o valor da condutividade térmica do solo $K = 0,76$, em $W m^{-2}$.

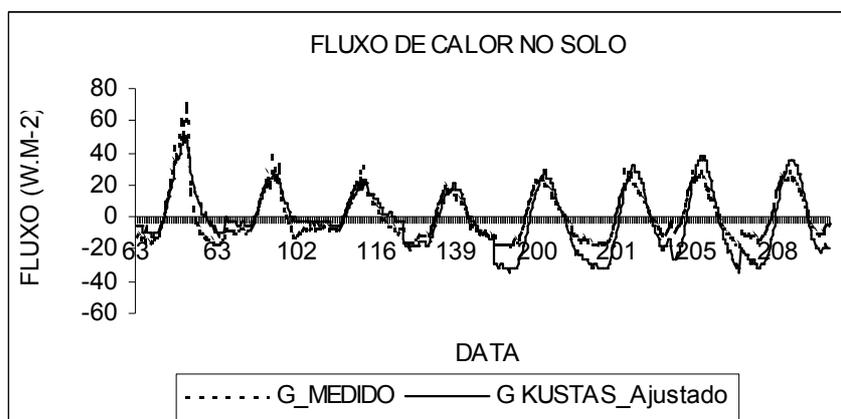


Figura 3 - Comparação do ciclo diário dos valores de G medido e estimado pela equação de Kustas et al.(2000), utilizando-se $K=0,76$, sob solo cultivado com cana-de-açúcar, em $W m^{-2}$.

Pode-se observar nas Figuras 2 e 3 que os valores medidos e estimados apresentaram uma correlação satisfatória e que a utilização do valor de $K=0,76$ reduziu a tendência de superestimativa da equação. Pode-se observar, ainda, na Figura 3 o bom ajustamento no ciclo diário entre os valores medidos e estimados pela equação de Kustas et al. (2000) quando se utilizou o valor da condutividade térmica do solo estimada ($K=0,76$).

O mesmo procedimento foi realizado para a área cultivada com coqueiro-anão, obtendo-se um valor de $K=1,02$. Na Figura 4 são apresentados os gráficos da correlação entre os valores dos fluxos medidos e estimados (A) e da comparação do ciclo diário (B):

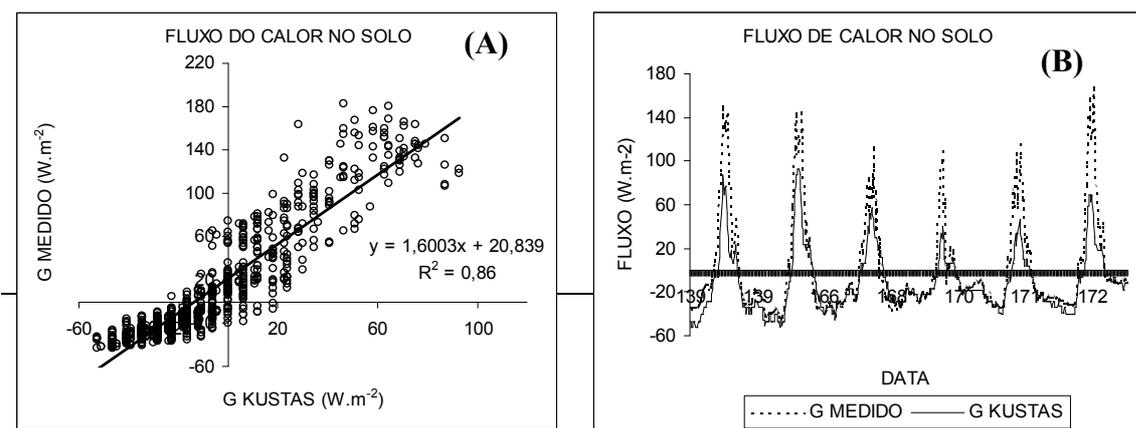


Figura 4 - Gráfico da correlação dos valores dos fluxos do calor do solo (G) medido e estimado (A) e do ciclo diário (B) na área ocupada com coqueiro-anão verde, em $W m^{-2}$.

Observa-se na Figura 4 (A), que os valores estimados subestimaram os valores medidos, apresentando, porém uma boa correlação ($R^2 = 0,86$) e em (B) pode-se observar que a subestimativa ocorreu, principalmente, nos períodos de picos de radiação, havendo um bom ajustamento nos demais períodos do dia.

Na Figura 5, é apresentada a correlação entre os valores instantâneos medidos e estimados pelo SEBAL nos pixels da cana-de-açúcar e do coqueiro-anão verde.

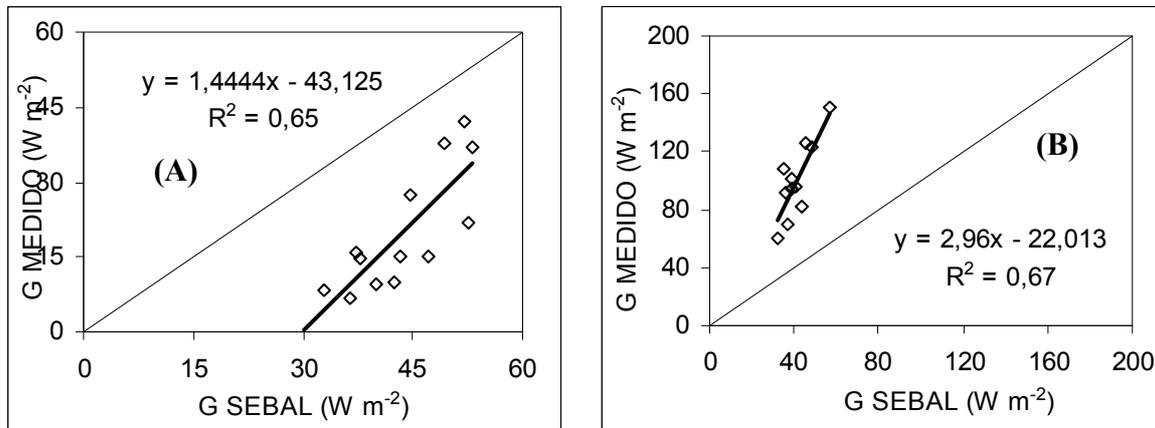


Figura 5 - Gráficos de correlação entre os valores do fluxo de calor no solo medidos por fluxímetros e estimados pelo SEBAL, nos pixels da cana-de-açúcar (A) e coqueiro anão (B), em $W m^{-2}$.

Comparando-se os valores do fluxo do calor do solo instantâneo estimado pelo SEBAL com os medidos pelos fluxímetros, observa-se que, no pixel da cana-de-açúcar (A), o SEBAL superestimou os valores medidos, enquanto que no pixel do coqueiro anão (B), ocorreu uma subestimação desses valores.

A subestimação dos valores medidos ocorrida na cultura da cana-de-açúcar pode estar relacionada à cobertura do terreno pelo dossel vegetal, que funciona como um isolante, evitando que os raios solares atinjam a superfície do solo. Um outro fator que pode estar relacionado a esse resultado é a utilização do produto MOD11A1 (Temperatura de Superfície) que considera como temperatura da superfície aquela emitida pelo dossel vegetal e não, necessariamente, da superfície do solo, não considerando a energia armazenada na biomassa da cultura. De outra forma, na cultura do coqueiro anão (B), os fluxímetros instalados a 1 cm de profundidade no solo, de textura arenosa, e não possuindo um dossel vegetal que pudesse funcionar como um filtro atenuante, a incidência da radiação solar direta justifica os altos valores medidos pelos fluxímetros.

Na Tabela 1, são apresentados os resultados estatísticos obtidos nas cartas do fluxo de calor no solo estimado pelo SEBAL em todo o período estudado.

Tabela 1 - Parâmetros estatísticos observados no fluxo do calor no solo (G) para todo o período de estudo, em $W m^{-2}$.

Data Juliana	Média	Máxima	Mínima
218	46,18	63,66	10,00
227	51,34	67,24	10,00
230	54,83	76,66	10,00
241	68,97	86,77	30,49
255	78,31	98,94	21,10
285	90,39	120,40	10,00
320	96,51	126,65	10,00
339	85,89	112,83	10,00
15	83,91	116,82	10,00
36	94,21	121,95	10,00
63	71,43	95,54	10,00
102	59,67	81,24	10,00
116	56,70	74,87	10,00
139	45,19	60,68	10,00
166	36,99	46,72	10,00
186	31,90	40,47	10,00
189	42,10	52,74	10,00
190	42,98	53,29	10,00
191	42,23	50,93	10,00
200	39,09	48,00	10,00
201	40,04	49,93	10,00
205	53,05	64,47	10,00
208	61,55	76,36	10,00
221	56,12	66,94	10,00

Observa-se que os valores médios do fluxo do calor no solo variaram de 31,90 a 96,51 $W m^{-2}$, com a mediana variando entre 33,87 e 100,22 e que os valores médios observados nos meses de outono/inverno e primavera/verão foram de 72,93 e 43,69 $W m^{-2}$, respectivamente. Esse comportamento se justifica pelo padrão climático da região, que apresenta períodos de chuvas bem definidos, onde ocorre incremento da biomassa vegetal, cobrindo o solo e o mantendo com mais umidade.

Na Figura 6 são apresentadas as variações espaciais dos fluxos do calor no solo estimadas pelo SEBAL para os dias 15/08/05 (DJ227), 16/11/05 (DJ320), 05/02/06 (DJ36) e 15/06/06 (DJ166), em $W m^{-2}$.

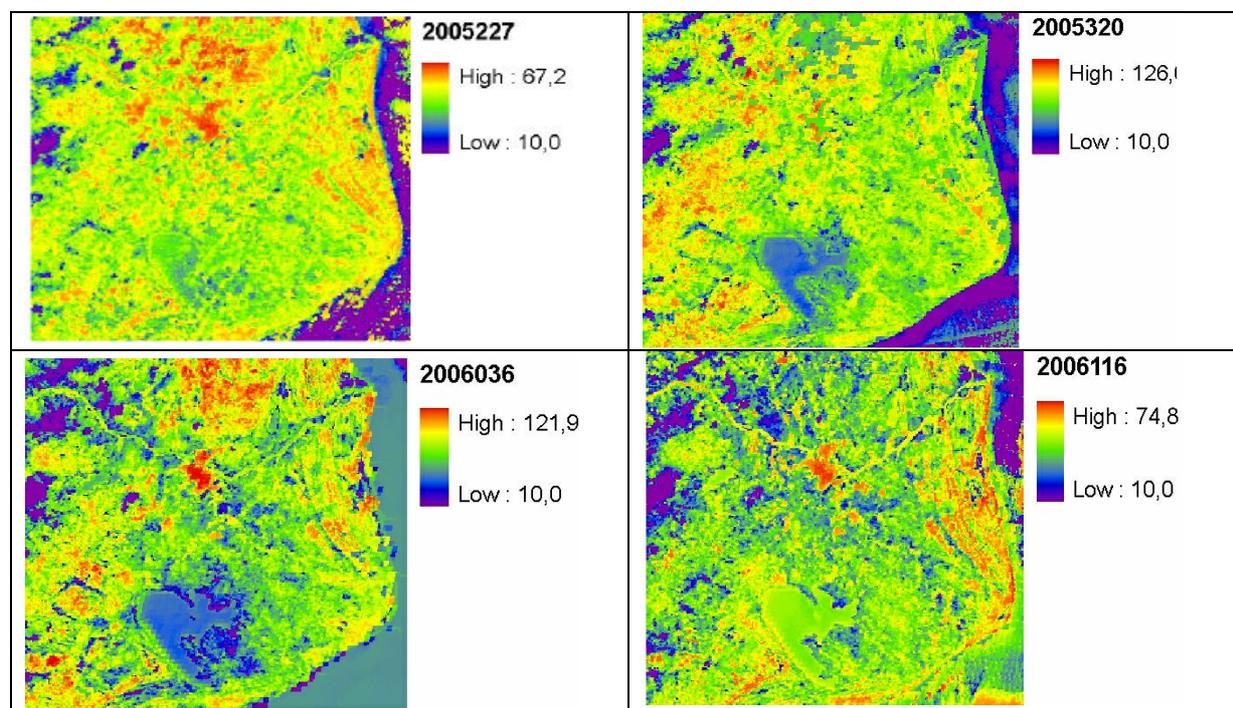


Figura 6 - Variação espacial do fluxo de calor no solo, estimado pelo SEBAL, na região Norte Fluminense, RJ, nos dias julianos 2005277 (A), 2005320 (B), 2006036 (C) e 2006116 (D), em $W m^{-2}$.

Observando-se a espacialização do fluxo de calor no solo, pode-se perceber valores menores nas áreas mais úmidas (corpos hídricos) e maiores nas áreas urbanas e nas áreas desprovidas de vegetação. Destaca-se, no centro do recorte, a cidade de Campos dos Goytacazes, RJ onde o fluxo de calor no solo é mais elevado, indicando a ocorrência de ilhas de calor, característica de áreas urbanas.

4. Conclusões

Os valores do fluxo do calor do solo estimados pelo SEBAL superestimaram os valores medidos sobre as áreas ocupadas com cana-de-açúcar e subestimaram os valores medidos nas áreas ocupadas com coqueiro anão verde.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, ao CNPq, a FAPERJ e a FENORTE, pelo auxílio financeiro e logístico que possibilitaram a instalação dos experimentos de campo, cujos resultados permitiram a elaboração desse artigo.

Referências Bibliográficas

- Azevedo, T. R., Galvani, E. (2003) Ajuste do ciclo médio mensal horário da temperatura do solo em função da temperatura do ar. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, 11 (2):123-130.
- Bastiaanssen, W. G. M. (1995) Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Ph,D Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands. 273p.
- Kustas, W. P., Morgan, M. S., Jackson, R. D., Gay, L. W., Duell, L. F. W., Kunkel, K. E., Mahias, A. D. (1990) Instantaneous and daily values of surface energy balance over agricultural fields using remote sensing and a reference field in an arid environment. *Remote Sensing of Enviroment*. 32:125-141.
- Kustas, W. P., Prueger, J. H., Hatfield, J. L., Ramalingam, K., Hipps, L. E. (2000) Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. *Agricultural and Forest Meteorology*. 103:249-264.
- Roerink, G.J., Su, Z., Menenti, M. (2000) SEBI: A Simple Remote Sensing algotythm to Estimate the Surface Energy Balance. *Physical Chem. Earth (B)*. v25(2): 147-157.
- Schneider, F. M. (1993) Modificações na temperatura do solo causadas por estufas de polietileno transparente de baixa densidade em Santa Maria, RS. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. 1(1):37-42.
- Yunhao, C. L., Xiaobing, J., Guiefei, S. (2003): An estimation model for daily regional evapotranspiration. *International Journal of Remote sensing*. 24(1):199-205.