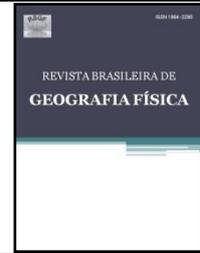




Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Balanco de energia à superfície em áreas heterogêneas através de algoritmos de sensoriamento remoto

Vinícius Gomes Costa Júnior¹, Carlos Antonio Costa dos Santos², Thiago Luiz do Vale Silva³

¹ Meteorologista da Agência Pernambucana de Águas e Clima, Av. Cruz Cabugá, 1111, Santo Amaro, Recife – PE. vinicius.gomes@apac.pe.gov.br (autor correspondente). ² Professor de Meteorologia, Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Avenida Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande – PB. carlos@dca.ufcg.edu.br. ³ Meteorologista da Agência Pernambucana de Águas e Clima, Av. Cruz Cabugá, 1111, Santo Amaro, Recife – PE. thiago.vale@apac.pe.gov.br.

Artigo recebido em 28/06/2016 e aceito em 25/03/2017

RESUMO

O objetivo deste estudo é a validação do balanço de energia estimado através do algoritmo S-SEBI sobre uma região heterogênea (composta por Cerrado e Cana-de-açúcar) e, por conseguinte, uma intercomparação com o algoritmo SEBAL e dados medidos em torres micrometeorológicas. Para a realização desta pesquisa utilizou-se sete imagens orbitais do TM Landsat 5, na órbita 220 e ponto 75, nas datas de 22/02, 11/04, 29/05, 14/06, 01/08 e 21/11, do ano de 2005, as quais a área estudada está inserida e que localiza-se no município de Santa Rita do Passa Quatro, no Estado de São Paulo. Os resultados demonstraram estimativas similares para o saldo de radiação com ambos os algoritmos, as quais estão relativamente próximas da realidade. Tratando-se dos fluxos de calor sensível e latente, os algoritmos não revelam alta destreza em estima-los e diferem quando intercomparados. O S-SEBI se mostrou uma ferramenta útil no contexto supracitado, ressaltando-se ainda que ambos os algoritmos foram desenvolvidos para utilização em áreas áridas ou semiáridas, isto reflete as dificuldades inerentes à realização da estimativa de balanço de energia em terrenos heterogêneos.

Palavras-chave: fluxos de energia, S-SEBI, SEBAL, desmatamento, região heterogênea.

Surface energy balance over heterogeneous areas through remote sensing algorithms

ABSTRACT

This study aimed the validation of the estimated energy balance provided by S-SEBI algorithm over a heterogeneous region (covered by Cerrado and sugar cane), using micrometeorological data and the output from SEBAL for an intercomparison. The modifications in the atmospheric parameters provoked by the deforestation were analyzed as well. Were used, as input for the algorithms, seven TM- Landsat 5 images, in the orbit 220 and point 75, generated in February 22, April 11, May 29, June 14, August 01 and November 21, 2005. They contain the studied sites, situated in the municipality of Santa Rita do Passa Quatro, in São Paulo state. The results showed that both algorithms perform similar and relative good estimates for net radiation. In the case of latent and sensible heat fluxes, the algorithms do not show dexterity in estimate them and differ greatly when intercompared. S-SEBI has proved itself as a useful tool in the aforementioned context; it should be emphasized that both algorithms were developed for using in arid or semi-arid areas, what reflects the difficulties inherent in the implementation of the energy balance estimation in heterogeneous areas.

Keywords: energy fluxes, S-SEBI, SEBAL, deforestation, heterogeneous region.

Introdução

No estado de São Paulo grandes extensões da vegetação primária foram transformadas em agro-ecossistemas e a cana-de-açúcar passou a ocupar os solos mais férteis de áreas em que predominavam o Cerradão e a floresta estacional, embora atualmente a cana-de-açúcar esteja também ocupando solos mais arenosos. O desmatamento e substituição da mata nativa pela

monocultura de cana-de-açúcar pode influenciar o clima regional através de alterações que venham a promover no balanço de energia local e em decorrência dos efeitos causados pelos aerossóis provenientes das queimadas, que regionalmente ocorrem no período da safra da cana-de-açúcar (Gomes, 2009).

Devido ao avanço tecnológico nas últimas décadas e o advento do satélite, tem sido possível estimar vários parâmetros biofísicos em várias

escalas espaço-temporais, podendo-se extrair informações globalmente. Para o entendimento das mudanças no ambiente e no clima o estudo detalhado das trocas de energia e água entre a superfície terrestre e a atmosfera constitui um interesse essencial. Segundo Bastiaanssen et al. (2000) a evapotranspiração (ET) é o parâmetro mais importante no monitoramento das necessidades hídricas das culturas e o consumo d'água em escala regional. Diferentemente da limitação dos outros métodos, a obtenção da ET via sensoriamento remoto orbital (SR) pode ser estimada em áreas heterogêneas, ressaltando-se assim a sua aplicabilidade e eficácia.

O S-SEBI (Simplified Surface Energy Balance Index) (Roerink et al., 2000) é um método que visa à obtenção dos fluxos de energia à superfície e que deriva a ET através da fração evaporativa (Λ). As vantagens de se utilizar a Λ em relação a outros parâmetros são: (a) é um índice de LE (calor latente) e ET (Shuttleworth et al., 1989); (b) Age como um indicador de seca ou estresse hídrico da superfície (Nishida et al., 2003); (c) é útil para dimensionar observações instantâneas para o período diurno; (d) é computacionalmente simples, versátil independente dos tipos de vegetação e não depende de dados meteorológicos de superfície como, por exemplo, a velocidade do vento, a estabilidade da camada limite, etc.

Basicamente, pelo S-SEBI determina-se uma dependência da reflectância com a temperatura máxima para condições secas e uma dependência da reflectância com a temperatura mínima para condições úmidas. As maiores vantagens sobre os outros algoritmos de fluxos através de sensoriamento remoto, apresentadas por Moran e Jackson (1991), Kustas e Norman (1996) e Bastiaansen (1995) são: (I) nenhum dado meteorológico adicional é necessário para se calcular os fluxos se os extremos hidrológicos da superfície estejam presentes e (II) as temperaturas extremas para as condições seca e úmida variam com a mudança dos valores de reflectância, onde os outros métodos tentam determinar uma temperatura fixa para as condições seca e úmida em toda a imagem e/ou para cada classe do uso do solo (Roerink et al., 2000).

Logo, o presente trabalho tem por objetivo a validação do balanço de energia estimado pelo algoritmo S-SEBI sobre uma região heterogênea (composta por Cerrado e cana-de-açúcar) no Estado de São Paulo e, por conseguinte, uma intercomparação com o algoritmo SEBAL e dados micrometeorológicos.

Material e métodos

A área a ser estudada localiza-se no município de Santa Rita do Passa Quatro, (21° 42' 37" S, 47° 28' 41" O, 748 m) no Estado de São Paulo. Ela possui uma área de 754,9 km² e está distante 77 km do município de Ribeirão Preto e 253 km da capital. O clima da região é tipicamente ameno e seco durante o inverno e quente e úmido durante o verão, com temperaturas médias mensais que variam entre 19 °C a 24 °C. A precipitação pluviométrica média anual é de 1498,0 mm (Pires Neto et al., 2005).

Os dados de superfície, provenientes de duas torres micrometeorológicas instaladas em dois diferentes tipos de biomas (Cerrado e cana-de-açúcar), compreendem o período entre 07 de fevereiro de 2005 a 06 de fevereiro de 2006, empregados na calibração e validação do algoritmo S-SEBI. A torre micrometeorológica do bioma Cerrado estava localizada na Fazenda São José do Pulador, Usina Santa Rita (21° 38' S; 47° 47' W; 552 m), no município de Luiz Antônio, SP. A outra torre, instalada em área com plantio de cana-de-açúcar, localizava-se na Gleba Pé de Gigante (21° 37' 9, 26" S; 47° 37' 56,38" W; 24 710 m), município de Santa Rita de Passa Quatro, SP. A Figura 1 apresenta a localização das torres supracitadas, a partir de um recorte de imagem TM-Landsat 5.

Neste estudo foram utilizadas imagens do Mapeador Temático a bordo do Landsat 5 visando o cômputo das componentes do balanço de radiação e energia. Estas imagens foram obtidas no site da Divisão de Geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As imagens disponíveis e sem presença de nuvens referentes à área de estudo estão dispostas na tabela 1.

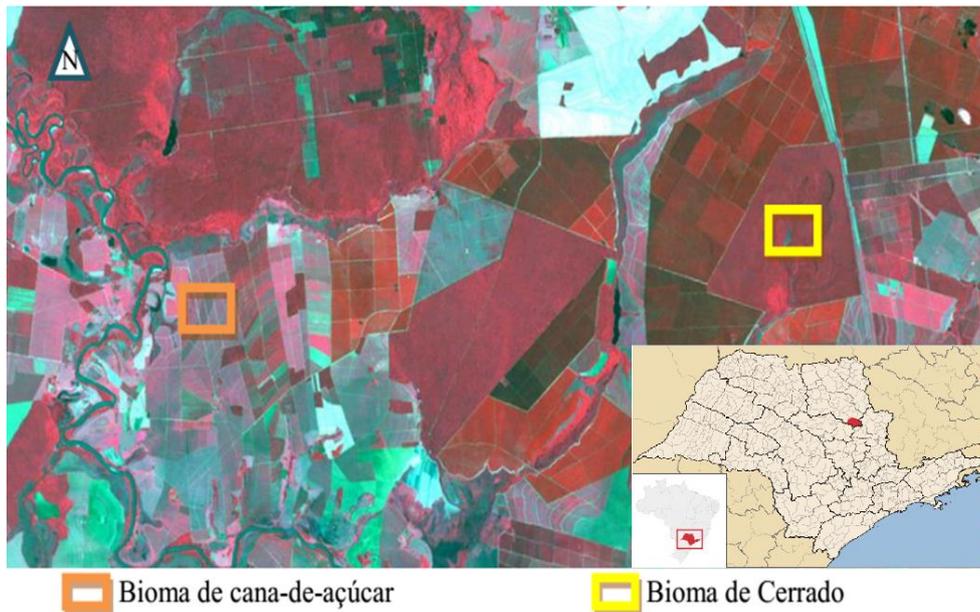


Figura 1. Recorte da imagem TM – Landsat 5 da área em estudo com a localização das torres micrometeorológicas nos biomas de cana-de-açúcar e Cerrado.

Tabela 1. Cenas utilizadas provenientes do Satélite Landsat 5 TM

Órbita	Ponto	Data de Passagem
220	75	22/02/2005
220	75	11/04/2005
220	75	29/05/2005
220	75	14/06/2005
220	75	16/07/2005
220	75	01/08/2005
220	75	11/11/2005

O Algoritmo S-SEBI

As etapas computacionais para a obtenção dos componentes do balanço de radiação e de energia à superfície, através do algoritmo S-SEBI estão apresentadas no fluxograma da Figura 2 e descritas posteriormente, os quais podem ser analisados detalhadamente em Roerink et al (2000).

No S-SEBI os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) não são calculados a priori como parâmetros separados, mas como fração evaporativa (Λ), dependentes ainda do fluxo de calor no solo (G) e saldo de radiação (R_n), sendo relacionados pela seguinte expressão:

$$\Lambda = \frac{LE}{(LE+H)} = \frac{LE}{(R_n-G)} \quad (1)$$

Juntamente com uma temperatura dependente da reflectância, T_{LE} , onde $LE_{m\acute{a}x}(r_0) = R_n - G$ e $H = 0$ (onde r_0 se refere a reflectância) e uma temperatura dependente da reflectância, T_H ,

onde $H_{m\acute{a}x}(r_0) = R_n - G_0$ e $LE = 0$ a fração evaporativa pode ser calculada como a razão de:

$$\Lambda = \frac{T_H - T_0}{T_H - T_{LE}} \quad (2)$$

em que T_0 é a temperatura de superfície.

A Figura 3 representa o esboço da relação reflectância, temperatura da superfície e fração evaporativa. Teoricamente em baixas reflectâncias a temperatura média é aproximadamente constante. O formato triangular do esboço revela as duas relações da reflectância com a temperatura para $LE_{m\acute{a}x}(r_0)$ – limite inferior) e $H_{m\acute{a}x}(r_0)$ – limite superior). Elas podem ser descritas como:

$$T_H = a_H + b_H\alpha \quad (3)$$

e

$$T_{LE} = a_{LE} + b_{LE}\alpha \quad (4)$$

Em que a e b são as variáveis de regressão e α corresponde à reflectância.

Substituindo as equações (3) e (4) na equação (2):

$$\Lambda = \frac{a_H + b_H \alpha - T_0}{a_H - a_{LE} + (b_H - b_{LE}) \alpha} \quad (5)$$

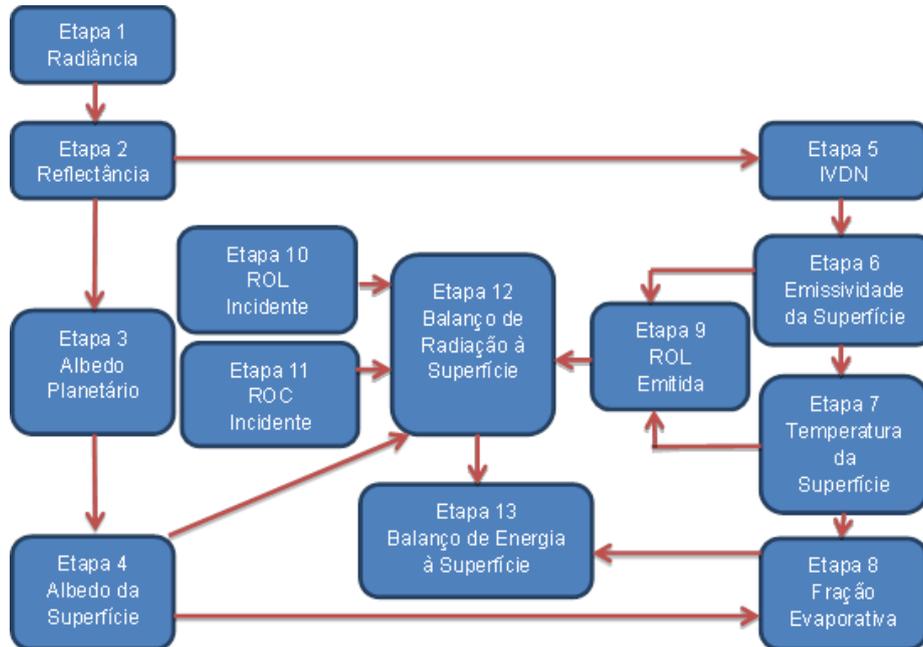


Figura 2. Fluxograma das etapas do processamento do S-SEBI para obtenção do balanço de radiação à superfície.

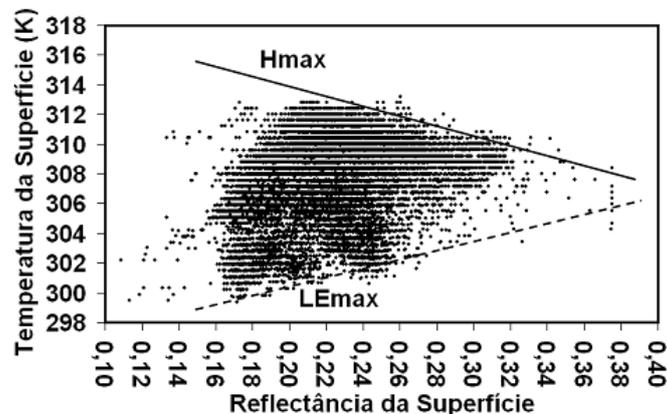


Figura 3. Representação esquemática da relação entre a temperatura da superfície e a reflectância da superfície. (Imagem retirada de Santos, 2009).

Fluxo de calor no solo no S-SEBI

O fluxo de calor no solo é determinado pela condutividade termal do solo e o gradiente de temperatura da parte superior do solo. Isto não pode ser diretamente determinado por técnicas de sensoriamento remoto. Muitos estudos têm mostrado que o fluxo de calor no solo e a fração do saldo de radiação ao meio dia são razoavelmente previsíveis por determinantes do sensoriamento remoto de características da vegetação (Daughtry et al., 1990). No entanto, a atenuação da radiação e a condutividade da transferência de calor no dossel e no solo, respectivamente, mudam

significativamente com o tipo de solo. A expressão utilizada para definir a densidade do fluxo de calor no solo é:

$$G = \Gamma R_n \quad (6)$$

Sendo:

$$\Gamma = \frac{T_0 - 273.15}{\alpha} \times (0,32\alpha + 0,62\alpha^2) \times (1 - 0,978NDVI^2) \quad (7)$$

Em que Γ é a razão entre a densidade do fluxo de calor no solo e o saldo de radiação (R_n), que é uma relação empírica da reflectância da superfície, temperatura da superfície e NDVI. As constantes da equação 6 foram estabelecidas por Bastiaanssen (1995).

Fluxo de calor sensível no S-SEBI

O fluxo de calor sensível é a transferência de calor entre a superfície e a atmosfera, intensificado pela convecção forçada ou livre. É obtida do saldo de energia disponível e da fração evaporativa como:

$$H = (1 - \Lambda) (R_n - G) \quad (8)$$

Fluxo de calor latente no S-SEBI

O fluxo de calor latente é a quantidade de energia utilizada para o processo de evaporação do

solo e o processo de transpiração das plantas. É obtido do saldo de energia disponível e da fração evaporativa como:

$$LE = \Lambda (R_n - G) \quad (9)$$

O Algoritmo SEBAL

As etapas computacionais para a obtenção dos componentes do balanço de radiação e de energia à superfície, através do algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) estão apresentadas no fluxograma da Figura 4 e descritas posteriormente e descritos detalhadamente em Baastiaanssen et al (1998). O algoritmo SEBAL foi selecionado por já ser bem difundido, a principal diferença entre ambos os algoritmos reside no cálculo dos fluxos de calor latente e sensível.

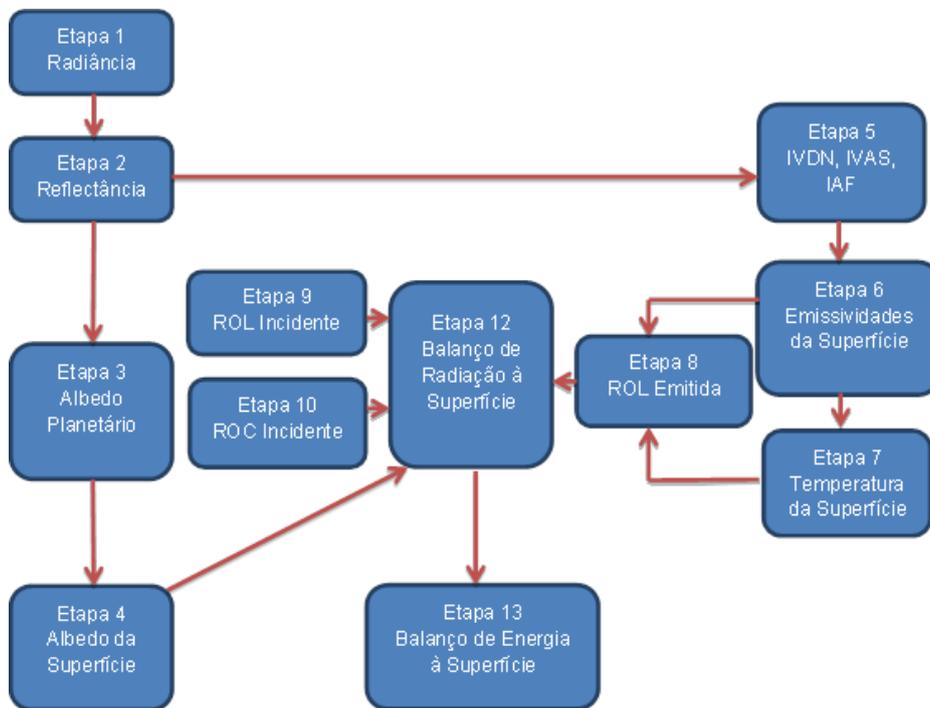


Figura 4. Fluxograma do processamento para a obtenção do balanço de radiação e de energia à superfície.

Fluxo de calor sensível no SEBAL

O fluxo de calor sensível é a taxa de perda de calor para a atmosfera por convecção ou condução, devido às diferenças de temperatura. Esta é a etapa mais delicada do SEBAL por envolver uma gama de pressupostos e considerações intrínsecos a sua estimativa. É calculado como função do gradiente de temperatura, rugosidade da superfície e da velocidade do vento, proposta pela seguinte equação:

$$H = \frac{\rho C_p dT}{r_{ah}} \quad (10)$$

Em que ρ é a densidade do ar ($K m^{-3}$), C_p é o calor específico do ar ($1004 J Kg^{-1} K^{-1}$), dT é a diferença de temperatura entre dois pontos próximos à superfície, e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ($s m^{-1}$). A solução se torna difícil, haja em vista que existem duas variáveis desconhecidas, r_{ah} e dT . Para facilitar o seu cálculo faz-se necessário a utilização

de dois pixels “âncoras” (onde se pressupõe que o valor de H pode ser previsto e a dT estimada) e da velocidade do vento em uma dada altura.

A resistência aerodinâmica ao transporte de calor é calculada admitindo-se a condição atmosférica neutra, e expressada por:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u^* k} \quad (11)$$

Em que z_1 e z_2 são as alturas em metros acima da superfície, as quais são consideradas como sendo, $z_1 = 0,1$ m e $z_2 = 2,0$ m (Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2002; Tasumi, 2003; Silva e Bezerra, 2006; Allen et al., 2007a). u^* é a velocidade de fricção ($m\ s^{-1}$) e k é a constante de von Karman (0,41).

Reúnem-se então os valores da velocidade do vento (u) e da altura média da vegetação — h (m), provenientes de uma estação meteorológica próxima ao local de estudo. Inicialmente se calcula o coeficiente de rugosidade, segundo a equação de Brutsaert (1982):

$$Z_{0m} = 0,12 h \quad (12)$$

A velocidade de fricção u^* ($m\ s^{-1}$) é estimada através do perfil logaritmo do vento para a condição de estabilidade neutra:

$$u^* = \frac{ku_x}{\ln\left(\frac{z_x}{Z_{0m}}\right)} \quad (13)$$

Em que u_x é a velocidade do vento na altura Z_x .

Em seguida, estima-se a velocidade do vento u_{200} , a 200 metros de altura, pois se assume que todos os pixels têm o mesmo valor, uma vez que os efeitos de rugosidade da superfície se tornam desprezíveis neste nível. Assim,

$$u_{200} = u^* \frac{\ln\left(\frac{200}{Z_{0m}}\right)}{k} \quad (14)$$

A partir deste ponto é possível à obtenção da velocidade de fricção para cada pixel da cena, através da equação:

$$u^* = \frac{k u_{200}}{\ln\left(\frac{200}{Z_{0m}}\right)} \quad (15)$$

Em que z_{0m} (m) é obtido em função do Índice de vegetação ajustado por solo (IVAS), segundo a equação proposta por Bastiansen (2000):

$$Z_{0m} = \exp(-5,809 + 5,62 IVAS) \quad (16)$$

Uma série de interações é necessária para se determinar o valor da resistência aerodinâmica para cada período do processo, que considera o impacto da instabilidade em r_{ah} e H. Admitindo-se ainda a condição de neutralidade, estima-se então a resistência aerodinâmica novamente pela equação (11).

Para se calcular o fluxo de calor sensível, a diferença de temperatura próxima a superfície (dT) para cada pixel deve ser determinada. O SEBAL computa dT para cada pixel assumindo uma relação linear entre dT e T_s (temperatura da superfície):

$$dT = b + aT_s \quad (17)$$

Em que b e a são obtidos a partir dos pixels âncoras (quente e frio). A linearidade de dT em função de T_s é o maior pressuposto do SEBAL. No entanto, análises de Bastiaanssen e de outros pesquisadores indicam que essa hipótese parece válida para a maioria das situações.

O pixel “frio” da imagem é escolhido admitindo-se que este se encontra em uma área bem irrigada, onde se assume que o fluxo de calor sensível é nulo ($H_{frio} = 0$) e, portanto, a diferença de temperatura é nula, e o fluxo de calor latente LE_{frio} é dado por:

$$LE_{frio} = R_n - G \quad (18)$$

O pixel “quente” é escolhido em uma área com grande exposição a um solo seco e sem vegetação, onde se assume que o fluxo de calor latente é nulo ($LE_{quente} = 0$) e o fluxo de calor sensível H_{quente} é dado por:

$$H_{quente} = \frac{\rho c_p (a+bT_s)}{r_{ah}} \quad (19)$$

Obtido o valor inicial de H para cada pixel, se recomeça o processo da Figura 6 com o intuito de refinar o seu valor a cada interação, corrigindo o efeito de instabilidade em cada pixel, até o valor de r_{ah} estabilizar.

Fluxo de calor latente no SEBAL

O fluxo de calor latente é a taxa de perda de calor da superfície devido ao processo de evapotranspiração. É calculado em função do saldo de radiação e dos outros fluxos:

$$LE = R_n - G - H \quad (20)$$

Em que os valores dos fluxos correspondem ao instante da passagem do satélite.

Resultados e discussão

Para a avaliação e validação do S-SEBI para fins de balanço de radiação e energia, foram produzidos mapas temáticos tanto do algoritmo S-SEBI como do algoritmo SEBAL, os quais estimam o saldo de radiação, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente. Visando as consequências acarretadas pelo desmatamento, estes mapas destacam duas áreas distintas, uma área focada no Cerrado e outra sobre o cultivo de cana-de-açúcar, de onde foram extraídas as médias aritméticas de cada área. Daí é feita uma comparação entre os algoritmos e os dados de superfície a fim de validar o algoritmo S-SEBI.

Validação do saldo de radiação

O saldo de radiação no dia 22 de fevereiro (primeiro dia do período estudado sem cobertura de nuvens) evidenciou que o Cerrado detém um maior R_n em comparação com o outro bioma em estudo. No geral o saldo obtido via S-SEBI se mostrou maior que o do SEBAL. O dia 11 de abril apresentou o mesmo comportamento que o evento anterior, apresentando um saldo entre 550-600 $W m^{-2}$ para o Cerrado e entre 450-550 $W m^{-2}$ para o bioma de cana-de-açúcar. Os corpos hídricos demonstraram um saldo entre 550 $W m^{-2}$ e 600 $W m^{-2}$, sendo inferiores ao valor médio de 751 $W m^{-2}$ encontrado por Silva (2005). O R_n atinge valores menores no dia 14 de junho. Os maiores R_n estimados durante o ano analisado estão concentrados no dia 11 de novembro, atingindo valores em suma maiores que 700 $W m^{-2}$, devido a proximidade com o verão. Os menores valores de R_n contidos nestas imagens estão exatamente sobre as áreas com menor índice de vegetação. O Cerrado, durante todo o ano, obteve R_n maiores que os da área de plantio de cana-de-açúcar concordando com valores reportados por Bezerra (2006), Paiva (2005) e Santos (2009) da ordem de 700 $W m^{-2}$ concentrando-se em regiões com maiores densidades de vegetação. Áreas com plantio de cana-de-açúcar foram apresentadas com valores inferiores a 650 $W m^{-2}$ no período frio e superiores a 800 $W m^{-2}$ no período quente (Andrade, 2008). Apesar de ambos algoritmos concordarem e mostrarem que a área de cana-de-açúcar dispõe de menos energia que a do Cerrado,

o S-SEBI demonstrou um melhor refinamento da distribuição espacial do saldo de radiação. Isto sugere uma clara vantagem do S-SEBI, o qual é um método mais simples, com relação ao método do SEBAL e de modelos similares que necessitam determinar o comprimento de rugosidade o qual é uma difícil tarefa. Ressalta ainda que nenhum método clássico de sensoriamento remoto provou ter sido preciso suficientemente para estimar bem esta variável (GOMES, 2005).

Os saldos estimados pelo algoritmo S-SEBI, são apresentados nas Tabelas 2 e 3, além dos valores observados nas torres localizadas no bioma de cana-de-açúcar e de Cerrado e a estimativa realizada pelo SEBAL. De maneira geral os algoritmos realizaram estimativas mais próximas da realidade para os dias com maiores saldos de radiação, onde os dados de superfície indicaram que o saldo variou entre 315,3 $W.m^{-2}$ e 718,8 $W.m^{-2}$ para a área de cana-de-açúcar e entre 375,6 $W.m^{-2}$ e 731,3 $W.m^{-2}$ para a área de Cerrado. O Cerrado mostra uma maior capacidade para armazenar energia que as regiões desmatadas, pois os valores observados e estimados sempre são maiores sobre o bioma de Cerrado. Isto se deve as diferenças que se encontram entre o albedo, temperatura da superfície e umidade, pois alterações nesses parâmetros afetam as condições microclimáticas dos ecossistemas, como já exposto por Wang et al (2002a,b) onde demonstrou que mudanças no albedo induzem a significantes alterações no microclimas. Os dois algoritmos realizaram estimativas mais adequadas para os dias com maiores R_n observados, superestimando-os para os outros dias. O valor mínimo observado foi 315,3 $W.m^{-2}$, nota-se uma dificuldade de ambos os algoritmos em estimar valores desta magnitude, uma vez que os valores mínimos estimados foram 399,651 $W.m^{-2}$ e 412,703 $W.m^{-2}$ através do SEBAL e S-SEBI, respectivamente. O S-SEBI no geral demonstrou uma maior destreza nas estimativas para os dois biomas, obtendo erros relativos médio de 17,7% e 13,6%, na área de cana-de-açúcar e Cerrado respectivamente, enquanto o SEBAL apresentou erro levemente superior, 18,9% e 15,0%. Apesar de ser menos difundido que o SEBAL, o S-SEBI se mostrou suficientemente capaz de estimar R_n , representando assim, uma ferramenta de grande utilidade e praticidade.

Tabela 2. Valores do saldo de radiação [$W.m^{-2}$] instantâneo do bioma de cana-de-açúcar estimados pelos métodos SEBAL e S-SEBI, e medições das torres micrometeorológicas, com respectivos erros relativos (%)

Saldo de radiação - Cana de Açúcar					
Data	Medido	SEBAL	S-SEBI	Erro SEBAL	Erro S-SEBI
22/02/2005	566,0	566,85	565,9	0,2	0,0
11/04/2005	478,2	500,10	511,46	4,6	7,0
29/05/2005	350,9	450,75	437,75	28,5	24,8
14/06/2005	315,3	399,65	412,70	26,8	30,9
16/07/2005	320,5	435,26	426,31	35,8	33,0
01/08/2005	350,4	450,70	442,97	28,6	26,4
21/11/2005	718,8	773,47	731,33	7,6	1,7
Erro Médio				18,9	17,7

Tabela 3. Valores do saldo de radiação [$W.m^{-2}$] instantâneo do bioma Cerrado estimados pelos métodos SEBAL e S-SEBI, e medições das torres micrometeorológicas, com respectivos erros relativos (%)

Saldo de radiação - Cerrado					
Data	Medido	SEBAL	S-SEBI	Erro SEBAL	Erro SEBI
22/02/2005	640,6	608,542	608,207	5,0	5,1
11/04/2005	540,1	547,803	560,765	1,4	3,8
29/05/2005	382,0	473,438	468,235	23,9	22,6
14/06/2005	387,3	456,16	460,039	17,8	18,8
16/07/2005	375,6	471,393	460,641	25,5	22,6
01/08/2005	395,6	497,973	483,985	25,9	22,3
21/11/2005	731,3	773,11	731,172	5,7	0,0
Erro Médio				15,0	13,6

Fluxo de calor no solo

Os fluxos de calor no solo são obtidos basicamente segundo a mesma metodologia em ambos os algoritmos. Os fluxos durante o ano permaneceram basicamente abaixo de $80 W.m^{-2}$, exceto para as áreas de solo exposto devido ao desmatamento, que apresentaram valores entre $80 W.m^{-2}$ e $120 W.m^{-2}$, como já evidenciado por Gomes (2009).

Validação do fluxo de calor sensível

Segundo Weligepolage (2005) a principal diferença entre o SEBAL e o S-SEBI está no cálculo do fluxo de calor sensível (H). Enquanto o SEBAL calcula o fluxo de calor latente (LE) como um termo residual do balanço de energia, o S-SEBI se utiliza da fração evaporativa para estimar prontamente estes dois fluxos.

Os fluxos de calor sensível estimados pelos dois algoritmos para os dois biomas estão dispostos na Tabela 4 e 5, bem como dos valores observados. Durante o verão o fluxo de calor sensível tende a ser maior (visto H tem proporcionalidade direta com a temperatura), como se pode notar pelos

valores medidos, demonstrados nas tabelas supracitadas. O H estimado, no primeiro dia analisado (22 de fevereiro), pelo SEBAL apresentou uma melhor distribuição espacial em relação ao valor obtido pelo S-SEBI, que foi nitidamente subestimado (valores próximos a zero $W.m^{-2}$) em ambos os biomas.

O S-SEBI tende a superestimar os valores em corpos hídricos, os quais deveriam ser negativos, como já comentado por Silva e Bezerra (2006), podendo também ser áreas que correspondem aos pixels cuja temperatura é inferior a temperatura do pixel frio utilizado pelo SEBAL. Andrade (2008) obteve valores negativos tanto para a superfície que apresentam água como algumas áreas de cultivo de cana-de-açúcar, bioma em que o H estimado pelo S-SEBI se mostrou mais eficaz que o SEBAL.

Verifica-se que dentre as datas analisadas, a do dia 29 de maio foi a que apresentou um o maior aumento do H estimado pelo SEBAL nos dois biomas. A área de cana-de-açúcar obteve valor entre $250 W m^{-2}$ e $300 W m^{-2}$, enquanto no Cerrado o H variou entre $50 W m^{-2}$ e $150 W m^{-2}$. Deve-se

ressaltar que a colheita da cana-de-açúcar foi realizada no mês de abril. De acordo com Arraes (2010) os maiores aumentos do H são registrados nas imagens das áreas antropizadas, o que evidencia intenso processo de degradação da vegetação nativa, visto que neste mês os valores de H dos biomas diferem muito entre si e em comparação com o mês anterior. No período de junho a agosto os algoritmos estimaram H adequadamente, exceto no dia que apresentou o menor valor medido de H (16 de julho), em que o SEBAL superestimou H, enquanto o S-SEBI se manteve coerente, o que demonstra que a técnica do S-SEBI, por estimar H de forma mais direta, seja mais conveniente.

Os maiores valores de H estimados durante o ano são encontrados no mês de novembro. O SEBAL estima valores acima de 400 W m^{-2} na área agrícola, ao passo que o S-SEBI estima H nesta mesma área no valor máximo de 250 W m^{-2} . Os fluxos de calor sensível estimados nos dois biomas se comportam similarmente em ambos os algoritmos, no entanto, verifica-se valores mais

baixos de H no bioma de cana-de-açúcar (abaixo de 60 W m^{-2}) do que no de Cerrado (valores entre 70 W m^{-2} e 110 W m^{-2}).

De maneira geral, as estimativas de ambos os algoritmos não se mostraram convincentes quando confrontadas com dados de superfície. O SEBAL apresentou o pior erro relativo médio, 70,7% no bioma de cana-de-açúcar, o S-SEBI por sua vez diferiu com os valores de superfície em média 45,9%. As estimativas não se demonstraram coesas também para o bioma do Cerrado, com 54,8% e 65,0% de erro relativo médio, para o SEBAL e S-SEBI, respectivamente. Timmermans (2006) em seu trabalho mostrou que os maiores erros gerados pelo SEBAL foram da ordem de 100 W m^{-2} . Estes erros elevados demonstram que os dois algoritmos não têm tanta habilidade em estimar esta variável em regiões muito heterogêneas, além destes erros se somam as incertezas associadas ao não fechamento do balanço de energia pela técnica das correlações turbulentas.

Tabela 4. Valores do fluxo de calor sensível [W.m^{-2}] instantâneo do bioma de cana-de-açúcar estimados pelos métodos SEBAL e S-SEBI, e medições das torres micrometeorológicas, com respectivos erros relativos (%)

Fluxo de calor sensível - Cana de Açúcar					
Data	Medido	SEBAL	S-SEBI	Erro SEBAL	Erro S-SEBI
22/02/2005	217,9	62,8	9,4	71,2	95,7
11/04/2005	140	72,7	179,0	48,1	27,9
29/05/2005	133,3	295,5	199,8	121,7	49,9
14/06/2005	151,9	196,3	205,1	29,3	35,1
16/07/2005	106,2	230,6	84,4	117,1	20,5
01/08/2005	133,5	167,8	121,0	25,7	9,3
21/11/2005	333,8	59,7	56,0	82,1	83,2
Erro Médio				70,7	45,9

Tabela 5. Valores do fluxo de calor sensível [W.m^{-2}] instantâneo de bioma de Cerrado e da cana-de-açúcar estimados pelos métodos SEBAL e S-SEBI, e medições das torres micrometeorológicas, com respectivos erros relativos (%)

Fluxo de calor sensível - Cerrado					
Data	Medido	SEBAL	S-SEBI	Erro SEBAL	Erro S-SEBI
22/02/2005	260,1	50,1	1,9	80,7	99,2
11/04/2005	170,4	95,8	123,1	43,8	27,7
29/05/2005	76,4	182,7	129,7	139,2	69,7
14/06/2005	146,8	100,0	35,5	31,9	75,8
16/07/2005	133,5	135,9	46,7	1,8	65,0
01/08/2005	131,6	99,2	72,6	24,6	44,8
21/11/2005	281,6	109,0	77,2	61,3	72,6
Erro Médio				54,8	65,0

Validação do fluxo de calor latente

Vê-se, pela análise do primeiro dia estudado, que a estimativa feita pelo SEBAL, no bioma de cana-de-açúcar, está compreendida entre 450 W m^{-2} e 500 W m^{-2} , com sua área vizinha apresentando valores inferiores, pois o solo está mais exposto. No bioma do Cerrado se verificou valores entre 500 W m^{-2} e 600 W m^{-2} . O S-SEBI faz uma superestimativa em relação ao SEBAL, ocasionando valores entre 550 W m^{-2} e 600 W m^{-2} para o Cerrado e 500 W m^{-2} e 550 W m^{-2} na região da cana-de-açúcar. Notou-se em nas análises que as regiões com menos vegetação são as que possuem os menores LE, assim como o esperado, pois a resposta do fluxo de calor latente depende da temperatura da superfície, umidade do solo e da fração vegetativa (MCCABE & WOOD, 2006). Silva & Bezerra (2006) estimaram valores entre $0,0 \text{ W m}^{-2}$ e aproximadamente 600 W m^{-2} na região de Petrolina e Fan et al. (2007) entre 30 W m^{-2} e 750 W m^{-2} .

A diferença entre valores dos dois biomas se torna maior no mês de maio, haja vista que já ocorreu à colheita da cana-de-açúcar e o solo está exposto, assim o fluxo desta área ficou abaixo de 200 W m^{-2} , corroborando a conclusão de Moreira (2010) que áreas com IVDN baixo, o albedo relativamente elevado e baixo fluxo de calor latente são indícios de áreas degradadas, de solo exposto ou pouca vegetação. Enquanto que o Cerrado, que se caracteriza por ser uma área com maior disponibilidade hídrica atinge valores de 450 W m^{-2} (estimativa do SEBAL) e 350 W m^{-2} (estimativa do S-SEBI). Sobrino (2007) mostra que os maiores valores de LE estão associados a um maior desenvolvimento da vegetação.

Os maiores fluxos obtidos durante o ano foram estimados para o dia 21 de novembro,

decorrentes de maiores saldos de radiação. É evidente o padrão de Cerrado e do bioma de cana-de-açúcar, o Cerrado excedendo 650 W m^{-2} e o segundo bioma com valores entre 550 W m^{-2} e 650 W m^{-2} .

As Tabelas 6 e 7 contêm os dados de calor latente à superfície para os dois biomas estudados e suas correspondentes estimativas realizadas pelo SEBAL e S-SEBI, além dos erros relativos, os quais auxiliam na validação do S-SEBI e com a inter-comparação dos dois algoritmos. Os algoritmos não representaram fielmente a realidade, pois mesmo com a incerteza associada às medições de superfície e o seu método de obtenção, os mesmos se mantiveram distante destas medições. As estimativas tiveram menores erros para a área do Cerrado, com um erro relativo médio de 38,7% para a estimativa do SEBAL e 49,5% para a do S-SEBI. Na área de cana-de-açúcar os erros relativos médios referentes às estimativas foram bastante elevados, atingindo 94,4% para o SEBAL e 128,8% para o S-SEBI. Portanto o S-SEBI, assim como o SEBAL, não foi capaz de reproduzir quantitativamente os fluxos de calor latente, pois em suma superestimam os valores reais. Os erros observados nos valores estimados de LE pelo SEBAL podem ser explicados em parte pelo fechamento forçado da equação do balanço de energia, fato que pode ser comprovado em diferentes situações expostas nos trabalhos de Kustas et al. (1999), Twine et al. (2000) e Randow et al. (2004). É possível que os erros gerados pelo S-SEBI sejam relacionados com a determinação do limite superior e inferior das temperaturas na obtenção da fração evaporativa, a qual pode afetar as estimativas de LE.

Tabela 6. Valores do fluxo de calor latente [W.m^{-2}] instantâneo do bioma de cana-de-açúcar estimados pelos métodos SEBAL e S-SEBI, e medições das torres micrometeorológicas, com respectivos erros relativos (%)

Fluxo de calor latente - Cana de Açúcar					
Data	Medido	SEBAL	S-SEBI	Erro SEBAL	Erro S-SEBI
22/02/2005	325,0	449,1	513,5	38,2	58,0
11/04/2005	327,9	379,9	284,7	15,8	13,2
29/05/2005	98,3	112,8	180,4	14,8	83,6
14/06/2005	36,2	159,0	152,8	339,2	322,0
16/07/2005	82,6	160,4	290,3	94,1	251,5
01/08/2005	134,7	234,3	269,9	73,9	100,4
21/11/2005	352,8	651,0	609,7	84,5	72,8
Erro Médio				94,4	128,8

Tabela 7. Valores do fluxo de calor latente [$W.m^{-2}$] instantâneo dos biomas Cerrado e da cana-de-açúcar estimados pelos métodos SEBAL e S-SEBI, e medições das torres micrometeorológicas, com respectivos erros relativos (%)

Fluxo de calor latente - Cerrado					
Data	Medido	SEBAL	S-SEBI	Erro SEBAL	Erro S-SEBI
22/02/2005	377,9	496,9	546,7	31,5	44,7
11/04/2005	369,3	403,9	390,0	9,4	5,6
29/05/2005	307,9	254,7	286,7	17,3	6,9
14/06/2005	153,5	322,1	386,2	109,8	151,6
16/07/2005	217,4	297,2	369,2	36,7	69,8
01/08/2005	265,1	355,3	363,3	34,0	37,0
21/11/2005	447,2	592,3	584,0	32,4	30,6
Erro Médio				38,7	49,5

Inter-comparação entre S-SEBI e SEBAL

Foram realizados "recortes" nas áreas do bioma de cana-de-açúcar e Cerrado, para verificar a concordância do S-SEBI com o SEBAL. As Figuras 5-7 apresentam a dispersão dos valores obtidos pelos dois algoritmos. O saldo de radiação estimado por cada um é praticamente o mesmo (alta correlação), os quais se aproximam da realidade, vide Figura 5. A pequena diferença entre as estimativas é devido ao fato dos algoritmos estimarem as emissividades de maneira distinta, como já explicitado na metodologia.

O fluxo de calor sensível difere muito entre eles (Figura 6), principalmente para a área de Cerrado devido a sua heterogeneidade, pois o SEBAL possui o viés de estimar resistência aerodinâmica ao transporte de calor, além de fazer

pressuposições na estimativa inicial de H que o S-SEBI não faz, utilizando-se a fração evaporativa para tal. Dentre as variáveis estimadas esta se demonstra como a distinção central entre os algoritmos.

Os algoritmos mostraram estimativas semelhantes para o fluxo de calor latente, apesar de ambos no geral superestimarem as medidas de superfície (Figura 7). Enquanto o SEBAL calcula o fluxo de calor latente (LE) como um termo residual do balanço de energia, o S-SEBI se utiliza da fração evaporativa para estimar prontamente estes dois fluxos, apesar das distintas metodologias, estas se equiparam. Assim, a evapotranspiração pode ser estimada com maestria a partir de ambos os algoritmos.

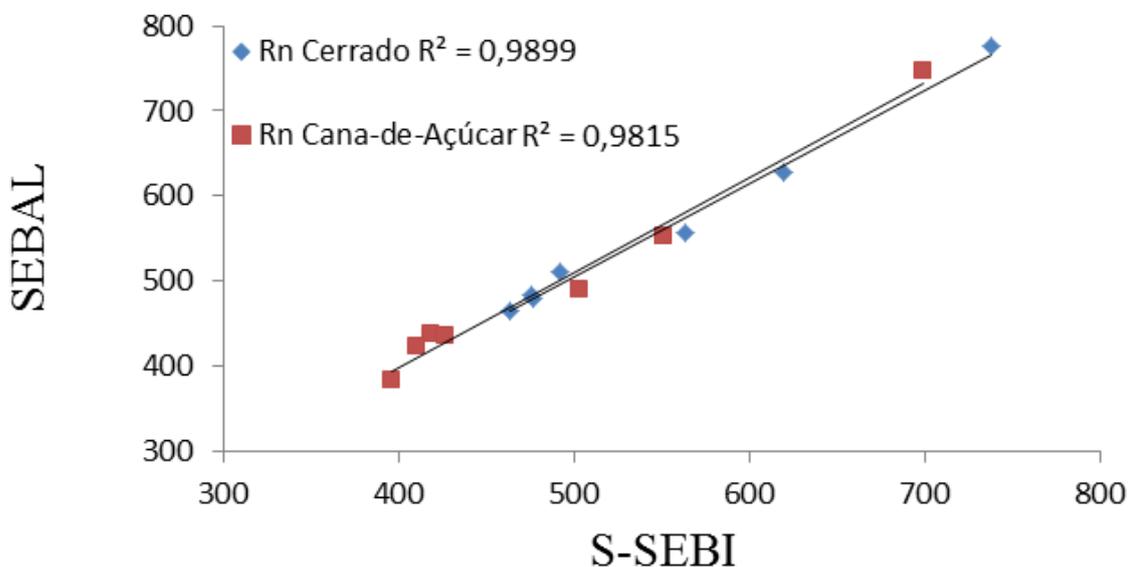


Figura 5. Comparação do saldo de radiação [$W.m^{-2}$] estimado pelo SEBAL e S-SEBI.

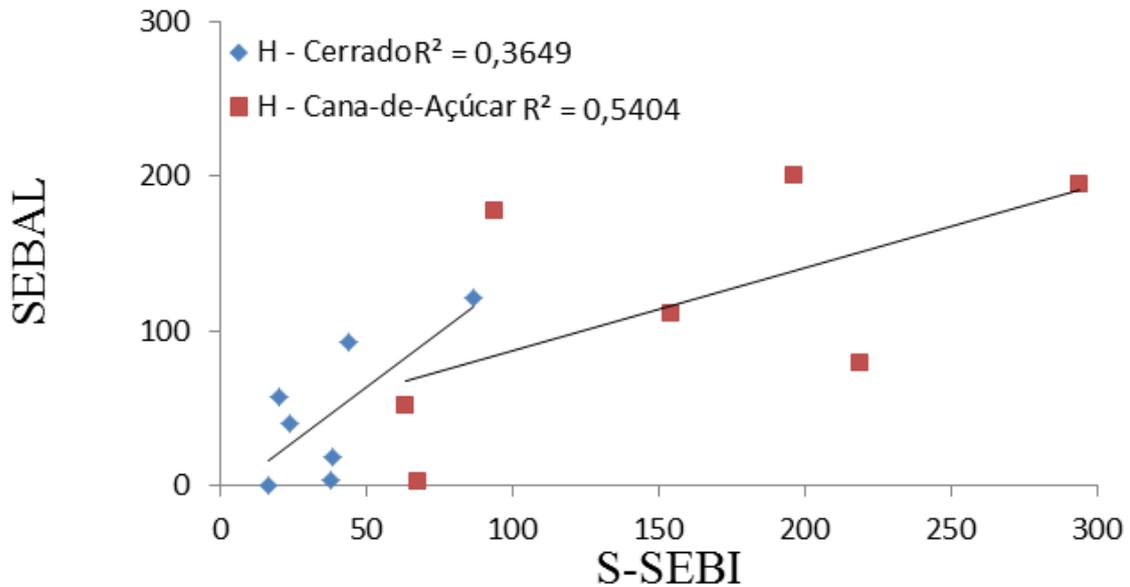


Figura 6. Comparação do fluxo de calor sensível [$W.m^{-2}$] estimado pelo SEBAL e S-SEBI.

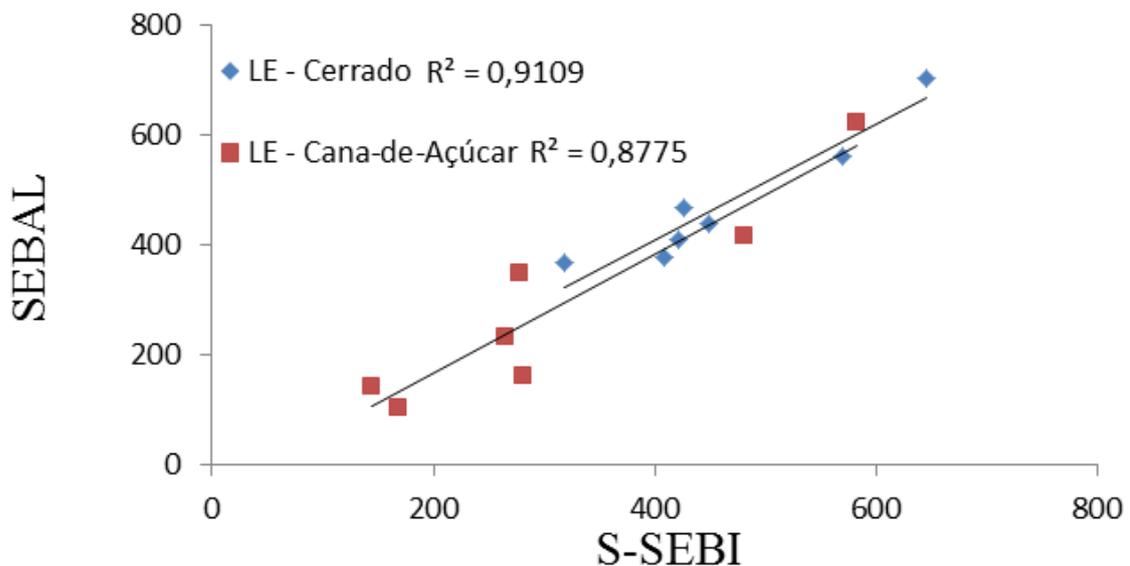


Figura 7. Comparação do fluxo de calor latente [$W.m^{-2}$] estimado pelo SEBAL e S-SEBI.

Conclusões

O S-SEBI e o SEBAL realizam estimativas de saldo de radiação relativamente bem, especialmente sobre o Cerrado. O S-SEBI, em média, demonstrou mais destreza.

Ambos os algoritmos tendem a superestimar os fluxos de calor latente, principalmente sobre regiões com menor presença de água.

Os algoritmos concordam nas estimativas de saldo de radiação e nos de fluxo de calor latente, apesar de este último parâmetro ser superestimado por ambas as técnicas, devido ser calculado

indiretamente, pela fração evaporativa no caso do S-SEBI e pelo fechamento do balanço de energia no caso do SEBAL.

Os erros encontrados demonstram que os dois algoritmos não tem habilidade apurada em estimar o fluxo de calor sensível em regiões muito heterogêneas e conseqüentemente em estimar o fechamento do balanço de energia à superfície. Assim, sugerisse que os algoritmos não sejam utilizados em vastas áreas heterogêneas e de geometrias complexas. Ressalta-se o fato de ambos os algoritmos terem sido desenvolvidos para áreas áridas ou semiáridas. Apesar de suas limitações o S-SEBI se mostrou válido como ferramenta de

estimativa do balanço de energia em regiões não áridas, por ser um algoritmo mais independente em relação aos dados de superfície e conseguir estimar os fluxos de maneira razoável.

Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa de pós-graduação do primeiro autor. Ao professor Dr. Humberto Rocha, que coordenou o projeto que gerou grande parte dos dados. Ao Dr. Heliofábio Barros por divulgar os mesmos em sua tese, os quais se tornaram norteadores ao presente trabalho.

Referências

- Allen, R. G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007. Satellite-based energy balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) - model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133, 380-394.
- Allen, R. G., Trezza, R., Tasumi M., 2002. Surface energy balance algorithms for land. *Advance training and user's manual*, v. 1.0. Disponível: https://www.researchgate.net/profile/Richard_Allen10/publications. Acesso: 01 out. 16.
- Andrade, R. G. 2008. Aplicação do algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada da cana-de-açúcar. Tese (Doutorado). Viçosa, UFV.
- Arraes, F. D. D. 2010. Dinâmica do balanço de energia na Bacia Hidráulica do Açude Orós e suas adjacências. Dissertação (Mestrado). Fortaleza, UFC.
- Bastiaanssen, W. G. M., 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Thesis (Ph.D.). Wageningen-Netherlands, Wageningen Agricultural University.
- Bastiaanssen, W. G., Menenti, M., Feddes, R. A., Holtslag, A. A. M., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology* 212-213, 198-212.
- Bastiaanssen, W. G. M., 2000. Sebal-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated gediz basin, Turkey. *Journal of Hydrology* 229, 87-100.
- Bastiaanssen, W. G. M., Molden, D. J., Makin, I. W., 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: Examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management* 46, 137-155.
- Bezerra, B. G., 2006. Balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no cariri cearense através do algoritmo SEBAL. Dissertação (Mestrado). Campina Grande, UFCG.
- Brutsaert, W., 1982. *Evaporation into the Atmosphere*. Springer. New York.
- Daughtry, C. S. T., Kustas, W. P., Moran, M. S., Pinter, P. J., Jackson, R. D., Brown, P. W., Nichols, W. D. Gay, L. W., 1990. Spectral estimates of net radiation and soil heat flux. *Remote Sensing of Environment* 32, 111-124.
- Fan, L.; Liu, S.; Bernhofer, C.; Liu, H.; Berger, F. H., 2007. Regional land surface energy fluxes by satellite remote sensing in the Upper Xilin River Watershed (Inner Mongolia, China). *Theoretical and Applied Climatology* 88, 231-245.
- Gomes, H. B., 2009. Balanços de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e Cerrado no Estado de São Paulo mediante imagens orbitais. Tese (Doutorado). Campina Grande, UFCG.
- Kustas, W. P., Prueger, J. H., Humes, K. S., Starks, P. J., 1999. Estimation of surface heat fluxes at field scale using surface layer versus mixed-layer atmospheric variables with radiometric temperature observations. *Journal of Applied Meteorology* 38, 224-238.
- Kustas, W. P., Norman, J. M., 1996. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Journal of Hydrological Sciences* 41, 495-516.
- McCabe, M. F., Wood, E. F., 2006. Scale influences on the remote estimation of evapotranspiration using multiple satellite sensors. *Remote Sensing Environment* 105, 271-285.
- Moran, M. S. Jackson, R. D., 1991. Assessing the spatial distribution of evapotranspiration using remotely sensed inputs. *Journal of Environmental Quality* 20, 525-737.
- Nishida, K., Nemani, R. R., Running, S. W., Glassy, J. M., 2003. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation. *Journal of Geophysical Research-atmosphere* 108, 1-14.
- Paiva, C. M., 2005. Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro, UFRJ.
- Pires Neto, A. G., Rocha, H. R., Cooper, M., Shida, C. N., 2005. Caracterização física do Cerrado Pé de Gigante e uso das terras na região—parte I: Fisiografia da região, in: Pivello, V. R., Varanda, E. M. O Cerrado do pé-de-gigante: ecologia e conservação – parque estadual de vassununga. SMA, São Paulo, pp. 15-28.

- Randow, C. V., Manzi, A. O., Kruijt, B., Oliveira, P. J., Zanchi, F. B., Silva, R. L., Hodnett, M. G., Gash, J. H. C., Elbers, J. A., Waterloo, M. J., Cardoso, F. L., Kabat, P., 2004. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology* 78, 5-26.
- Roerink, G. J., Su, Z., Menenti, M. A., 2000. Simple Remote Sensing Algorithm to Estimates the Surface Energy Balance. *Physics and Chemistry of the Earth* 25, 147-157.
- Santos, C. A. C., 2009. Estimativa da evapotranspiração real diária através de análises micrometeorológicas e de sensoriamento remoto. Tese (Doutorado). Campina Grande, UFCG.
- Shuttleworth, W. J., Gurney, R. J., Hsu, A. Y., Ormsby Fife, J. P., 1989. The variation in energy partition at surface flux sites. *IAHS Publ.* 186, 67-74.
- Silva, B. B., Bezerra, M. V. C., 2006. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - LANDSAT 5. *Revista brasileira de agrometeorologia* 14, 174-183.
- Silva, B. B., Lopes, G. M., Azevedo, P. V., 2005. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. *Revista Brasileira de Meteorologia* 20, 243-252.
- Sobrino, J. A., Gómez, M., Jiménez Muñoz, J. C., Olioso, A., 2007. Application of a simple algorithm to estimate daily evapotranspiration from NOAA/AVHRR images for the Iberian Peninsula. *Remote sensing of environment* 110, 139-148.
- Tasumi, M., Allen, R. G., Trezza, R., Wright, J. L., 2005. Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131, 94-109.
- Timmermans, W., Jiménez-Muñoz, J. C., Hidalgo, V., Richter, K., Sobrino, J. A., D'Urso, G., 2011. Estimation of the spatially distributed surface energy budget for AgriSAR 2006. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 4, 465-481.
- Wang, S., Grant, R. F., Versegny, D. L., Black, T. A., 2002a. Modelling carbon dynamics of boreal forest ecosystems using the Canadian Land Surface Scheme. *Climatic Change* 55, 451-477.
- Wang, S., Grant, R. F., Versegny, D. L., Black, T. A. 2002b. Modelling carbon-coupled energy and water dynamics of a boreal aspen forest in a General Circulation Model land surface scheme. *International Journal of Climatology* 22, 1249-1265.
- Weligepolage, K. 2005. Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration bay satellite remote sensing – A casa study in Hupselse Beek, The Netherlands. Dissertation (Master). Wageningen-Netherlands, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation.