

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/3 479-491
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MODELOS DE ALBEDO DA SUPERFÍCIE EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR COM DADOS DO SENSOR MODIS/TERRA

*Performance Analysis of Surface Albedo Models in Sugarcane Crop Areas with
MODIS/Terra Data*

**Bruno Silva Oliveira, Elisabete Caria Moraes, Bernardo Friedrich Theodor
Rudorff & Guilherme Augusto Verola Mataveli**

**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR**

Avenida dos Astronautas, 1.758, Jardim da Granja. CEP: 12227-010, São José dos Campos, SP, Brasil.
bruno.so@dsr.inpe.br
bete@dsr.inpe.br
bernardo@dsr.inpe.br
mataveli@dsr.inpe.br

*Recebido em 08 de Fevereiro, 2014/Aceito em 10 de Maio, 2014
Received on February 08, 2014/ Accepted on May 10, 2014*

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande importância no Brasil, com uma intensa expansão na região Centro-Sul na última década, principalmente devido à crescente demanda de etanol a partir de 2003. Esse cenário exige que se avaliem os impactos gerados pela expansão da cultura no balanço de radiação e nos fluxos de energia na superfície, que estão intrinsecamente relacionados com os parâmetros de superfície como o albedo. O albedo de superfície é uma das variáveis críticas na modelagem do balanço de radiação, variando em função das transformações no uso e cobertura da terra e das condições de umidade do solo, com impacto direto no balanço de energia e no clima. Na modelagem do albedo com dados de sensoriamento remoto, diferentes metodologias podem gerar resultados diferentes entre si, dependendo de fatores intrínsecos ao alvo ou ao próprio sistema sensor. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar as estimativas do albedo de superfície segundo os modelos de Liang (2000) e Tasumi et al. (2008) para as safras 2005/06 e 2006/07 de uma plantação de cana-de-açúcar, considerando como verdade terrestre os dados meteorológicos obtidos no sítio experimental do município Luís Antônio - SP em área de cana-de-açúcar. O modelo de Liang (2000) apresentou melhor desempenho, ainda que tenha subestimado o albedo em 19% durante as duas safras avaliadas, enquanto o modelo de Tasumi et al. (2008) subestimou em 24%. Nas fases de crescimento e maturação da cultura, onde há menor influência do solo na reflectância, os modelos de Liang e Tasumi subestimaram, respectivamente, 9% e 16%.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar, Albedo de Superfície, Sensoriamento Remoto, MODIS.

ABSTRACT

Sugarcane is a crop of great importance in Brazil, presenting a rapid expansion in South-Central Brazil during the last decade, mainly due to the growing demand for ethanol since 2003. This situation requires to evaluate the impacts generated by sugarcane crop expansion over net radiation and energy fluxes at the surface, which are intrinsically related to parameters such as surface albedo. Surface albedo is one of the critical variables in modeling the net radiation, and

its variation depends on land use and land cover changes and soil moisture conditions, causing direct impacts on energy balance and climate. When modeling albedo using remote sensing data, different methodologies can result in different estimates when compared, depending on the target characteristics and the sensor system itself. In this context, this study aimed to evaluate estimates of surface albedo using the methodologies proposed by Liang (2000) and Tasumi et al. (2008) in a sugarcane crop area during 2005/06 and 2006/07 harvest, considering weather data obtained from the experimental site in the municipality Luís Antonio - SP on a sugarcane plantation as ground truth. Liang (2000) methodology presented better performance, even though it underestimated surface albedo in 19% during the study period, while Tasumi et al. (2008) methodology underestimated surface albedo in 24%. Considering only growth and maturation stages of sugarcane development, where there is less influence on soil in reflectance, Liang (2000) and Tasumi et al. (2008) methodologies underestimated surface albedo in 9% and 16%, respectively.

Keywords: Sugarcane, Albedo, Remote Sensing, MODIS.

1. INTRODUÇÃO

A expansão da cultura da cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil vem ocorrendo desde 2003 devido à crescente demanda de etanol, gerando questionamentos socioambientais que necessitam ser avaliados e respondidos (RUDORFF et al., 2010). O aumento da demanda por biocombustíveis tem convertido principalmente áreas de culturas agrícolas e de pastagens em áreas de cana-de-açúcar, causando alterações no uso e ocupação da terra, o que pode gerar impactos nos fluxos de energia na superfície e na evapotranspiração (LOARIE et al., 2011). Assim, é importante que os efeitos da expansão da cana-de-açúcar sejam entendidos e contribuam com informações relevantes para a formulação de políticas públicas que maximizem as vantagens do etanol e minimizem seus impactos negativos.

Dentre as variáveis afetadas pela expansão da cana-de-açúcar, o albedo de superfície (α) tem destaque por controlar diretamente o balanço de radiação na superfície e, conseqüentemente, afetar balanço de energia. O albedo pode ser definido como a razão entre a irradiância solar refletida pela superfície terrestre e a irradiância solar nela incidente, ambas integradas em todo o espectro solar. O principal fator que afeta o albedo são as mudanças no uso e cobertura da terra (HE et al., 2012), que estão intrinsecamente relacionadas com as alterações na umidade do solo e no ciclo fenológico da vegetação. Essas alterações afetam as relações de absorção de radiação eletromagnética pela superfície e transforma de maneira direta o balanço de radiação, os fluxos de calor latente e sensível, o regime de ventos e de chuvas, culminando na alteração das condições do microclima da região

(PEREIRA et al., 2000; LIANG, 2000; ALLEN et al., 2002; ALLEN et al., 2007; PEREIRA et al., 2009). Avaliando o efeito da expansão da cana-de-açúcar sobre áreas de pastagem, Loarie et al. (2011) verificaram um incremento de 1,6% no albedo após a conversão de uso do solo.

Dessa forma, o monitoramento espacial e temporal do albedo é um importante passo na implementação de modelos climáticos, uma vez que a acurácia em sua estimativa será determinante na qualidade da modelagem dos fluxos energéticos e evapotranspiração (LIANG et al., 2002; PAPE e VOHLAND, 2010).

A utilização de dados de sensoriamento remoto para o monitoramento do meio ambiente é uma alternativa vantajosa, pois possibilita a obtenção de informações detalhadas para extensas áreas com baixo custo e resolução temporal adequada ao monitoramento de culturas agrícolas como a cana-de-açúcar, além da quantificação contínua e espacializada de parâmetros físicos da superfície, o que permite a melhoria de modelos agrometeorológicos e de previsão de tempo e clima (PAIVA et al., 2011). No entanto a estimativa do albedo por meio de metodologias que empregam dados de sensoriamento remoto apresenta limitações, como a aplicabilidade dos modelos propostos na literatura a áreas com diferentes usos e coberturas da terra e a dificuldade de validação devido à incompatibilidade espacial dos valores observados em campo com o tamanho do *pixel*, como por exemplo o do sensor MODIS que apresenta resolução espacial de 250, 500 e 1000m (LIANG et al., 2002). No caso da cana-de-açúcar, as diferentes fases fenológicas da cultura apresentam diferentes influências sobre a resposta de reflectância da superfície, uma vez que a superfície pode ser dominada pelo solo, no

estabelecimento da cultura, ou totalmente pela vegetação, quando a cultura está plenamente desenvolvida.

Nesse contexto, este estudo tem por objetivo avaliar os modelos de estimativa do albedo de superfície propostos por Liang (2000) e Tasumi et al. (2008) utilizando como variáveis de entrada dados do sensor MODIS/Terra. As estimativas foram comparadas com valores de albedo observados em uma área de cana-de-açúcar localizada no município de Luís Antônio – São Paulo, para posterior aplicação dessa variável na modelagem do balanço de radiação e balanço de energia na superfície em áreas de cana-de-açúcar. As estimativas compreendem dois ciclos da cultura, durante as safras 2005/06 e 2006/07.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os modelos para estimativa do albedo da superfície utilizados neste estudo empregam imagens do sensor MODIS, disponibilizadas na forma de bandas de reflectância da superfície. Conforme descrito abaixo, as estimativas geradas com os modelos foram comparadas com os dados observados em superfície.

2.1 Dados de superfície

Os dados de superfície foram coletados entre maio de 2005 e maio de 2007 em uma plantação de cana-de-açúcar da Companhia Energética Santa Rita (USR) (Figura 1). Nesta plantação foi instalada uma plataforma instrumental localizada nas coordenadas 21° 38' 13,4" S e 47° 47' 24,9" O, a 552m de altitude, onde além do albedo também foram coletados dados meteorológicos e medidas de fluxos turbulentos, sendo estes obtidos por meio de um sistema de *eddy covariance*. A irradiância solar global e a exitância solar (irradiância solar refletida) foram medidas por um Piranômetro Licor 200X, instalado na plataforma experimental a uma altura de 8,5 m (TATSCH, 2006; GOMES, 2009).

A área de cana-de-açúcar (>400 ha) em que a torre estava instalada apresentava distância entre linhas de plantação de 1,4m e declividade menor que 2%, sendo rodeada por pasto, plantação de citrus e áreas de cerrado (CABRAL et al, 2012; GOMES, 2009). A cana-de-açúcar foi plantada em 2003, passando anteriormente por duas colheitas com queima da palha (2004

e 2005). Os dados utilizados correspondem à segunda rebrota, com início em 14 de abril de 2005, estendendo-se até a colheita em 11 maio de 2006 (totalizando 393 dias), e a terceira rebrota, com colheita no dia 20 de maio de 2007 (totalizando 374 dias).

O solo da área é caracterizado como Latossolo Vermelho-amarelo, com composição textural de 22% argila, 74% areia e 3% silte (CABRAL et al., 2012). De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima da região é classificado como tropical com estação seca (Aw), com o período mais seco ocorrendo quando a declinação solar está mais baixa e, portanto, os dias mais curtos. As temperaturas variam de 18,2° no inverno, que é marcadamente seco e de temperaturas amenas, a 24,1°C no verão, que é úmido e quente. A precipitação na região segue um padrão sazonal, com a estação chuvosa estendendo-se de outubro a março, com média anual é de 1516 mm. Os valores médios de precipitação mensal ultrapassam 200mm de dezembro a fevereiro, enquanto nos meses de inverno (junho, julho e agosto) não ultrapassam 50mm (CEPAGRI, 2014; GOMES, 2009).

2.2 Dados de satélite

Os dados de sensoriamento remoto utilizados foram obtidos pelo sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo do satélite Terra, com órbita polar a uma altitude de cerca de 700 km, ângulo de imageamento de ±55° e faixa imageada de 2330 km. A partir dos dados fornecidos pelo sensor MODIS são gerados diversos produtos voltados aos estudos da atmosfera e superfície (oceanos e continentes). Esses produtos são distribuídos de forma gratuita pelo *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LPDAAC). Eles foram obtidos no formato HDF (*Hierarchy Data Format*), com projeção Sinusoidal, e convertidos para o formato TIFF (*Tagged Image File Format*) por meio da ferramenta MRT (*Modis Reprojection Tools*), desenvolvida pelo *Earth Resources Observation System Data Center* (EDC) e pelo LPDAAC. No processamento no MRT, definiu-se a saída para todos os produtos em Coordenadas Geográficas (Lat-Long) e Datum WGS84.

Neste estudo foi utilizado o produto MOD09GA, referente à reflectância *in band* de

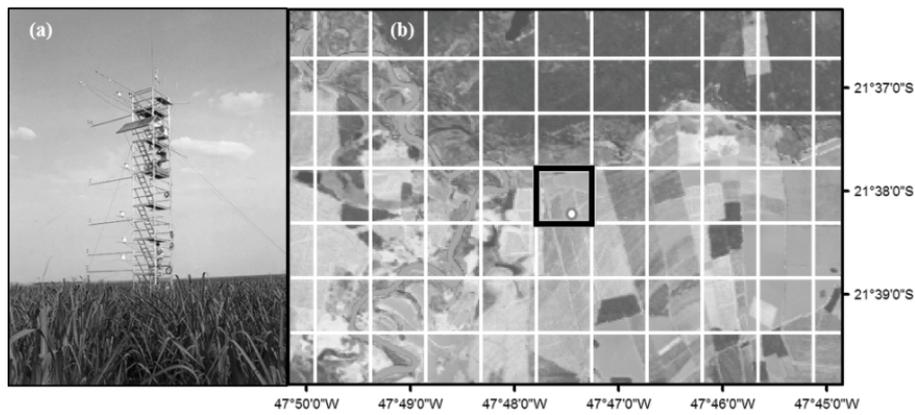


Fig. 1 - (a) Torre de monitoramento de fluxos turbulentos USR – SP. Fonte: Adaptado de Rocha (2004); (b) localização da torre (círculo branco) na área de cana-de-açúcar da USR – Imagem Landsat 5 TM de 14/04/2006 (RGB543). A grade em branco indica a posição dos *pixels* do MODIS, com destaque para o *pixel* central em preto utilizado para comparação das estimativas, onde a torre de monitoramento se localizava.

superfície medida pelas bandas 1 a 7 do sensor, com resolução espacial de 500m e 1000m, em projeção Sinusoidal e repetitividade diária. Esse produto é uma estimativa da reflectância de superfície, sendo computado a partir do nível 1A nas bandas 1 a 7 com os comprimentos de onda centrados em 0,648 μm , 0,858 μm , 0,470 μm , 0,555 μm , 1,240 μm , 1,640 μm , e 2,130 μm , respectivamente (VERMOTE e VERMEULEN, 1999). O produto é disponibilizado com correção atmosférica, na qual os procedimentos aplicados foram estabelecidos a partir do modelo denominado *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum Radiative Code* (6S), desenvolvido por Vermote et al. (1997).

As datas de aquisição dos dados MODIS (Tabela 1) foram selecionadas de acordo com sua qualidade quanto à cobertura de nuvens, ângulo de visada do sensor (sempre inferiores a 15 graus) sobre a área de interesse e condição de umidade do solo, avaliada através do balanço hídrico no solo descrito por Allen et al. (1998). Datas com grande quantidade de chuva nos dias anteriores foram descartadas, de forma a obter estimativas do albedo sob superfícies com condições similares de umidade no solo. A Figura 2 ilustra as condições da cana-de-açúcar no campo, desde o estabelecimento da cultura até a fase de maturação. Dessa forma, é possível comparar o albedo de superfície sob maior influência do solo (início do ciclo) ou com maior resposta da vegetação (cultura desenvolvida).

2.3 Estimativa do albedo de superfície

Os modelos utilizados para a estimativa do albedo de superfície com dados MODIS foram os de Liang (2000) e Tasumi et al. (2008), calculados como uma média ponderada das reflectâncias das bandas 1 a 7 do sensor MODIS (Equação 1). O peso atribuído a cada banda (Tabela 2) representa a fração de toda a radiação solar de onda curta que chega à superfície da Terra que está compreendida no intervalo espectral da mesma (TASUMI et al., 2008).

$$\alpha = \left(\sum_{b=1}^7 [\rho_b \cdot w_b] \right) + cte \quad (1)$$

em que ρ_b é a reflectância de cada banda do sensor MODIS, w_b é o respectivo peso na média ponderada e “cte” é um fator de ajuste constante somado à média ponderada.

O modelo proposto por Liang (2000) foi desenvolvido por meio da desagregação da reflectância da superfície a partir de simulações de transferência radiativa, incorporando diferentes condições atmosféricas e espectros de reflectância característicos de diferentes tipos de cobertura da terra. Por fim, o autor propõe equações com fatores de conversão para diversos sistemas sensores, entre eles o sensor MODIS. De maneira similar, Tasumi et al. (2008) propõem uma equação para o albedo também desenvolvida com uso de um modelo de transferência radiativa (SMARTS2), com simulações para 100 combinações de ângulo

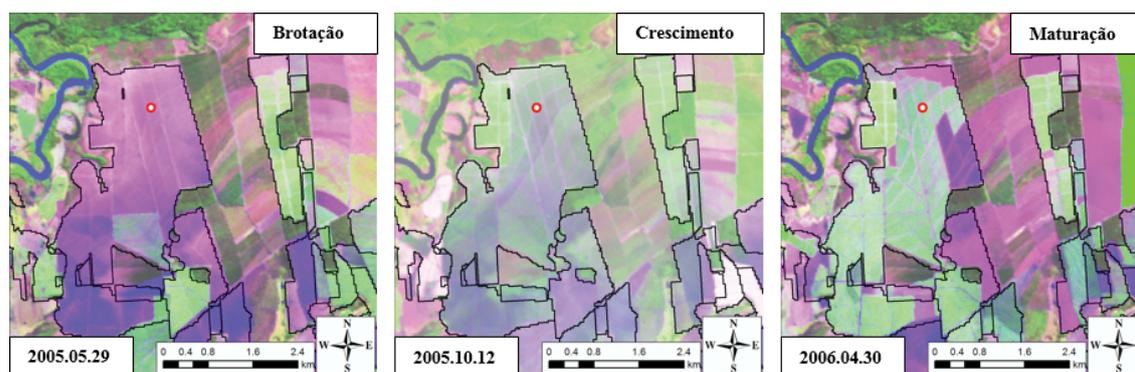


Fig. 2 - Exemplo das fases fenológicas da cana-de-açúcar no sítio experimental. Cenas TM Landsat – Composição RGB 543. O círculo vermelho indica a localização da plataforma experimental na plantação de cana-de-açúcar, ponto de medição utilizado na validação das estimativas de albedo.

Tabela 1: Datas de aquisição das imagens MODIS para estimativas do albedo de superfície. DAP é a quantidade de dias após o plantio

Safrá 2005		Safrá 2006	
Data	DAP	Data	DAP
12/05/2005	28	15/05/2006	4
14/05/2005	30	17/05/2006	6
06/06/2005	53	02/06/2006	22
15/07/2005	92	25/06/2006	45
31/07/2005	108	04/07/2006	54
02/08/2005	110	11/07/2006	61
16/08/2005	124	18/07/2006	68
03/09/2005	142	20/07/2006	70
10/09/2005	149	06/09/2006	118
03/10/2005	172	13/09/2006	125
12/10/2005	181	31/10/2006	173
06/11/2005	206	23/11/2006	196
13/04/2006	364	31/03/2007	324
29/04/2006	380	02/04/2007	326
01/05/2006	382	16/04/2007	340
		18/04/2007	342
		04/05/2007	358

Tabela 2: Pesos atribuídos às bandas do sensor MODIS no cálculo do albedo de superfície segundo os modelos de Liang (2000) e Tasumi et al. (2008)

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	Cte
Liang	0,160	0,291	0,243	0,116	0,112	-	0,081	-0,0015
Tasumi	0,215	0,215	0,242	0,129	0,101	0,062	0,036	-

zenital solar, umidade do ar e elevação do terreno para uma superfície hipotética com reflectância espectral de 0,2. Seu objetivo é melhorar a precisão das estimativas do saldo de radiação e componentes do balanço de energia estimados por modelos como o SEBAL (BASTIAANSEN, 1995), METRIC (ALLEN et al., 2007) e o SEBS (SU 2002; JIA et al., 2003). As estimativas de

albedo dos dois modelos foram comparadas aos valores observados (referentes ao horário do imageamento) por meio de análise de regressão, com cálculo do coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE) (MAYER e BUTLER, 1993).

O índice de área foliar (IAF) foi calculado segundo a equação 2, descrita por Allen et al. (2010), com o objetivo de evidenciar, ao longo do desenvolvimento da cultura, a contribuição do solo ou da vegetação na resposta de reflectância e, conseqüentemente, no albedo de superfície. O IAF é um dos principais parâmetros biofísicos que caracterizam a interface planta-atmosfera, sendo definido como a área das folhas em relação à área de solo abaixo do dossel (DORAISWAMY et al., 2004). Nas estimativas de IAF foram adicionadas algumas datas durante o período chuvoso para gerar a curva dessa variável de forma mais detalhada, evidenciando o comportamento da variável durante os ciclos da cana-de-açúcar. Para tanto, imagens com ângulo de visada superior a 15 graus foram incluídas, desconsiderando nesse caso os efeitos da geometria de aquisição da imagem na estimativa do IAF.

$$\text{IAF} = 11 \cdot \text{SAVI}^3 \quad \text{para } \text{SAVI} \leq 0.817$$

$$\text{IAF} = 6 \quad \text{para } \text{SAVI} > 0.817 \quad (2)$$

sendo SAVI é o índice de vegetação ajustado para o solo (HUETE, 1988), descrito pela equação (3):

$$\text{SAVI} = (1 + L) \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}} + L} \quad (3)$$

em que ρ_{nir} é a reflectância na banda do infravermelho próximo, ρ_{red} é a reflectância na banda do vermelho e L é o fator de correção

para o brilho do solo. O valor de L varia de acordo com a quantidade de vegetação sobre o solo, variando de L=0 (sem vegetação verde) até L=1 (cobertura vegetal intensa). Neste estudo utilizou-se o valor de L = 0,1 para o cálculo do SAVI.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os valores de albedo medidos em superfície no horário de passagem do satélite Terra (~10:30) ao longo das safras 2005 e 2006. Durante as duas safras o albedo variou de acordo com o desenvolvimento da cultura, a incidência de chuva e condições de manejo da cultura. Gomes (2009) relata que em maio de 2005 houve queima da palhada na área de cana-de-açúcar, o que reduziu abruptamente o albedo nas datas subsequentes, conforme se verifica na Figura 3.

O albedo diminui nos primeiros meses do ciclo 2005/06, à medida que a cultura se estabelece no campo. Entre outubro e novembro de 2005 o albedo atinge o valor mínimo, verificando-se um aumento após esses meses, até a fase de maturação da cultura, em maio de 2006, quando foi realizada a colheita. Na safra 2006/07 observa-se o mesmo padrão, com o albedo diminuindo gradualmente de acordo com o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Os valores mínimos são observados próximos ao mês de outubro, quando, com o início da estação chuvosa, o albedo aumenta até a fase de maturação. O incremento do IAF (Figura 4) nesse período reduz a contribuição do solo na resposta de reflectância da superfície, conforme descrito por Tatsch (2006). André et al. (2010) observaram o albedo aumentando de acordo com o crescimento do IAF da cana-de-açúcar, com valor médio de 0,24 no perfilhamento, 0,27 a 0,30 para o desenvolvimento dos colmos e 0,31 para a fase de maturação, onde há presença de folhas secas (palhada). Apesar de esses valores serem maiores do que os obtidos para a cana-de-açúcar neste estudo, verifica-se padrão de aumento do albedo de acordo com o crescimento do índice de área foliar, principalmente nos primeiros meses de desenvolvimento da cultura (Figura 4).

De acordo com Esteves et al. (2012), em períodos de menor disponibilidade hídrica, os valores de albedo tendem a serem maiores do que

em períodos com mais precipitação. Em geral, verificou-se uma variação no comportamento do albedo de acordo com a incidência de precipitação (Figura 3). Nos meses sem incidência de precipitação, como entre abril e outubro de 2006, foi verificada uma menor flutuação nos valores de albedo para a cana-de-açúcar, uma vez que a condição de umidade do solo é mais constante, não alterando a reflectância da superfície como ocorre em períodos chuvosos.

Em períodos chuvosos a vegetação se torna mais verde e os solos ficam mais escuros, o que impacta diretamente no albedo. Dessa forma, de acordo com Querino *et al.* (2006), espera-se que em períodos com maior disponibilidade hídrica os valores de albedo sejam menores do que os obtidos na mesma área sob condição de seca, assim como foi observado por Oliveira et al. (2014) ao comparar os valores de albedo para o Estado de São Paulo para o mês de agosto (estação seca) dos anos de 2006 e 2007. Os autores verificaram menores valores de albedo para o ano de 2007, atribuindo esse resultado à maior disponibilidade hídrica no sistema solo-planta-atmosfera na data de aquisição da imagem de satélite. Segundo OKE (1987), a contribuição do solo no albedo varia de acordo com sua cor e o teor de água presente, já para a vegetação a maior influência é relativa ao conteúdo de água na planta. O albedo pode ainda ser influenciado pelo comprimento de onda, pela reflectância local e pela condição de iluminação, que será discutida mais adiante (LOPES et al., 2007; MATOS et al., 2013).

Os efeitos da disponibilidade de água no solo e vigor da vegetação nos padrões sazonais de albedo também são discutidos por Wang e Davidson (2007).

As estimativas realizadas com os modelos de Liang e Tasumi ao longo das duas safras avaliadas são apresentadas na Figura 5, em comparação ao albedo observado no sítio experimental na área de cana-de-açúcar. Os maiores desvios entre as estimativas de albedo e os dados observados em campo ocorrem logo após a colheita, durante a estação seca, mostrando que os dois modelos não simularam satisfatoriamente o albedo no Latossolo Vermelho-Amarelo exposto. A queima da palhada em 2005 relatada por Gomes (2009) pode ter gerado impactos na resposta de reflectância do solo, afetando

os valores de albedo simulados pelos modelos nessa época.

A partir do mês de agosto de 2005 e de setembro de 2006 os dois modelos simularam valores mais próximos aos medidos em campo, melhorando, portanto, seu desempenho na transição da estação seca para a chuvosa, como mostra a Figura 5. Essa melhora se dá juntamente com o incremento do IAF e a redução da contribuição do solo na reflectância da superfície. Há três datas em que o albedo simulado foi maior que o observado: 12/10/2005, 06/11/2005

e 31/10/2006. Isto possivelmente é devido à interferência das condições atmosféricas na resposta de reflectância, pois nessa época há maior ocorrência de nebulosidade. A presença de nebulosidade na cena aumenta a quantidade de radiação refletida que é observada pelo sensor, contaminando os dados e levando a valores superestimados de reflectância da superfície. Destaca-se ainda a data 23/11/2006, em que o albedo foi subestimado pelos dois modelos, possivelmente devido à presença de umidade residual no solo, uma vez que foi registrada

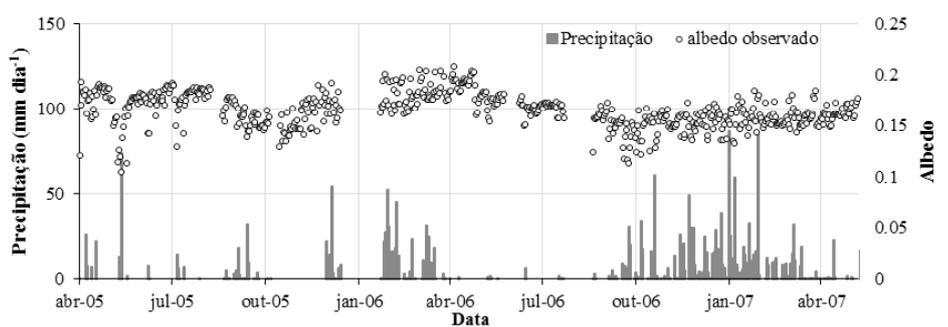


Fig. 3 - Albedo observado no momento da passagem do satélite Terra (~10:30) no sítio experimental sobre plantação de cana-de-açúcar no município de Luís Antônio ao longo dos ciclos 2005/06 e 2006/07; Precipitação acumulada diária (mm dia⁻¹).

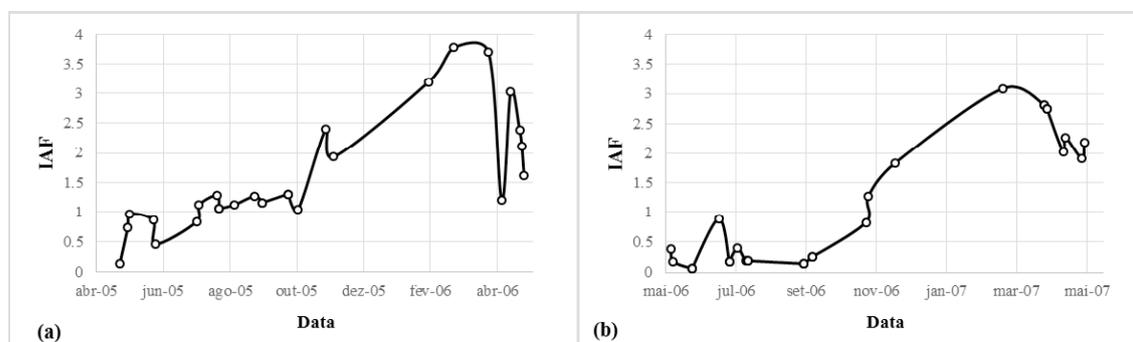


Fig. 4 - Índice de área foliar (IAF) ao longo das safras (a) 2005/06 e (b) 2006/07 no pixel referente à plantação de cana-de-açúcar no sítio experimental no município de Luís Antônio-SP.

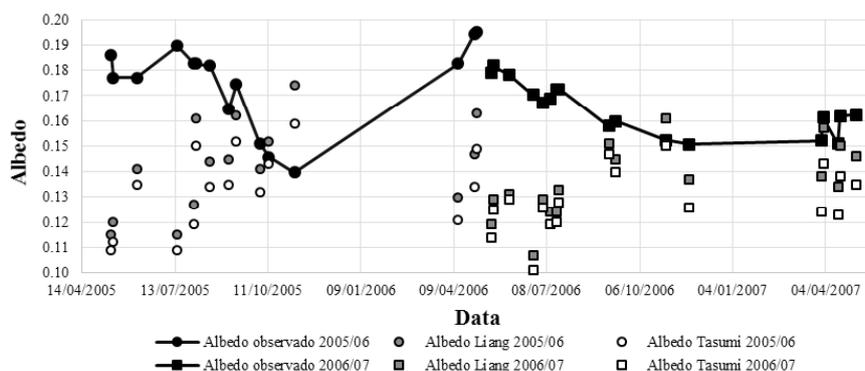


Fig. 5 - Variação do albedo de superfície observado e modelado pelos modelos de Liang (2000) e Tasumi (2008) para a área de cana-de-açúcar no sítio experimental no município de Luís Antônio nas safras (a) 2005/06 e (b) 2006/07.

incidência de precipitação na semana anterior a aquisição da imagem de satélite.

A falta de imagens livres de nuvens e com ângulos de visada adequados limita a análise do albedo nos meses da estação chuvosa (dezembro, janeiro e fevereiro). No entanto, em simulações com imagens MODIS com ângulos de visada superiores a 15 graus, não incluídas nessa análise, as estimativas dos modelos de Liang e Tasumi são próximas aos valores observados, com desvios semelhantes aos verificados nos meses de outubro e novembro (Figura 5). Deve-se salientar que em imagens do sensor MODIS com ângulo de visada superior a 15° o horário de imageamento varia, com possibilidade de diferenças de até 45 minutos no imageamento em relação ao horário de passagem do satélite no nadir. Isso interfere diretamente no albedo da superfície, que varia ao longo do dia em função da elevação solar (MINNIS et al., 1997), além do fato de que superfícies naturais apresentam comportamento anisotrópico (LIESENBERG et al., 2007), portanto o albedo da superfície modelado com dados de satélite depende da geometria de observação e iluminação. Segundo André et al. (2010), o albedo na cana-de-açúcar apresenta valores mais altos no início da manhã e no entardecer, com valor mínimo próximo ao meio-dia, devido ao menor ângulo de incidência dos raios solares, que causa maior penetração e retenção da radiação no interior do dossel.

Com o final da estação chuvosa, a cultura entra na fase de maturação, havendo nessa fase uma redução do IAF e mudança no padrão de reflectância do dossel vegetal, devido à presença de folhas secas. Dessa forma, nota-se um incremento no albedo nos últimos meses do ciclo 2005/06 (Figura 5). Com a colheita e início do novo ciclo, o comportamento se repete, com o albedo diminuindo durante a estação seca e crescendo com a transição da estação seca para a chuvosa. Esse comportamento está de acordo com o descrito por Georgescu et al. (2013), que assumem valores de albedo próximos a 0,20 logo após a colheita, chegando a valores próximos de 0,15 antes da transição para a estação chuvosa, voltando a subir com o crescimento e maturação da cultura. Andrade (2008) utilizou o modelo de Liang para estimar o albedo de superfície em cana-de-açúcar com imagens MODIS, obtendo também uma variação de acordo com o estágio

de desenvolvimento e condição hídrica da cultura, além da época do ano.

Gomes (2009) obteve valores de albedo entre 0,16 e 0,20 para cana-de-açúcar empregando os parâmetros apresentados por Allen et al (2007) e Tasumi et al (2008), observando também valores maiores (até 0,22) em algumas áreas da cultura. Tatsch (2006) aponta o efeito da maior umidade superficial do solo no albedo, devido às chuvas isoladas, como ocorre um mês após o início ciclo em maio de 2005 (Figura 3). Domingues et al. (2011) obtiveram resultados de albedo variando em função do tipo de solo e método de colheita. No caso de Latossolo Vermelho-Amarelo com tipo de colheita híbrido (mecânica e com queima) o albedo variou entre 0,14 e 0,19, não apresentando a mesma amplitude de variação durante o ciclo como foi observada para o caso de colheita somente com queima em Latossolo Vermelho (entre 0,10 e 0,22). Esteves et al. (2012) obtiveram valores médios de albedo de 0,20 para a fase de brotação, 0,26 para a fase de perfilhamento, 0,28 para a fase de desenvolvimento dos colmos e 0,26 para a fase de maturação, sobre um solo classificado como Cambissolo Háplico Eutrófico. Utilizando os coeficientes propostos por Tasumi (2008), Ruhoff (2011) estimou o albedo em uma plantação de cana-de-açúcar em Sertãozinho-SP, que variou entre aproximadamente 0,15 e 0,19.

Comparando os dois modelos, o de Liang apresentou melhor desempenho, aproximando-se mais dos valores observados em campo em 29 das 32 simulações, ainda que durante a estação seca os erros relativos do modelo de Liang tenham ultrapassado 39% e os de Tasumi 42%. Na aplicação de dados de sensoriamento remoto em modelos de balanço de radiação, subestimativas de albedo levam a superestimativas do balanço de radiação, dificultando a modelagem de outras componentes do balanço de energia com precisão. OLIVEIRA et al (2014) observa que valores de saldo de radiação mais elevados na época em que o albedo é menor para as áreas de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, atribuindo os menores valores de albedo no ano de 2007 à maior presença de umidade no sistema solo-planta-atmosfera.

Além das limitações dos dois modelos em reproduzir o albedo de superfície, as medidas de campo podem estar sujeitas a erros. O manual

do piranômetro Licor 200X recomenda que não se use esse sensor para medidas de radiação refletida, especificando que a largura de banda com que o sensor trabalha está entre 400 nm e 1100 nm (MANUAL DO LICOR 200X, 2010; GOMES, 2009). Dessa forma, a estimativa de albedo de superfície com os dados de superfície pode ser comprometida, uma vez que as medidas não abrangem todo o espectro solar.

Comparando os dois ciclos da cultura, nota-se que no ciclo 2006/07 apresentou menores valores de IAF durante o crescimento da cultura, mesmo havendo nesse ciclo uma maior incidência de precipitação. Esse efeito também é notado no albedo (Figura 5), onde o aumento da variável durante o crescimento e maturação da cana-de-açúcar é mais brando que o do ciclo 2005/06. Entretanto, para a fase de maturação os modelos de Liang e Tasumi apresentam comportamento semelhante nas duas datas, gerando valores de albedo entre 0,12 e 0,16, com o modelo de Liang sempre se aproximando mais dos valores observados.

Segundo Liang et al. (2002), um dos maiores problemas na validação de produtos derivados do sensor MODIS com dados medidos em superfície é a incompatibilidade entre a medida pontual e a resolução desse sensor. A resolução espacial do produto MOD09GA pode incorporar a resposta espectral de diferentes alvos na superfície, contaminando a resposta de reflectância do alvo de interesse, como se pode verificar no *pixel* central da Figura 1b.

Ainda há a possibilidade de erros no albedo calculado induzidos pelos dados do produto MOD09GA, visto que o algoritmo minimiza, porém não elimina os efeitos do ângulo de visada do sensor, além da correção atmosférica do produto, que não leva em conta alguns parâmetros atmosféricos locais (GOLTZ, 2009).

Apesar de se ter limitado os ângulos de visada abaixo de 15°, nota-se valores diferentes de albedo simulados para intervalos de dois dias, onde os ângulos sobre a área de cana-de-açúcar são de 12° (direção de espalhamento frontal) e -15° (direção de retro-espalhamento). Essa diferença é uma evidência de que o albedo estimado pelos dois modelos avaliados é sensível ao efeito do ângulo de visada, pois cada ângulo implica em uma condição de imageamento

diferente em relação à iluminação da superfície, supondo ainda que a geometria de iluminação, a umidade do solo e a distribuição espacial da cana-de-açúcar sejam as mesmas. Nos pares de datas próximas, foi verificado que os valores de albedo simulados com imagens com ângulo de visada de 12° foram sempre menores que aqueles com ângulo de -15°. Segundo Mattar et al. (2014), em alguns casos a estimativa do albedo da superfície com dados de sensoriamento remoto é problemática devido à baixa amostragem em diferentes ângulos, o que leva a erros decorrentes da geometria de imageamento.

Os valores de albedo estimados com os modelos de Liang e Tasumi foram comparados com os observados na área de cana-de-açúcar por meio de análise de regressão, conforme apresentado na Figura 6.

De maneira geral, o modelo de Liang subestimou o albedo de superfície em 19% (Figura 6a), com $R^2=0,97$, $MAE=0,03$ e $RMSE=0,04$ enquanto o de Tasumi subestimou a variável em 24% (Figura 6b), com $R^2=0,97$, $MAE=0,04$ e $RMSE=0,05$, apresentando sempre valores menores (em média 6%) do que os estimados pelo modelo de Liang. Deve-se salientar que os maiores erros foram obtidos logo após as datas de colheita, chegando-se a um erro relativo de 42,5% na data de 15/07/2005 pelo modelo de Tasumi.

Desse modo, considerando somente as fases de crescimento e maturação da cana-de-açúcar nos dois ciclos, em que há menor interferência do solo na reflectância, a análise de regressão indica que o modelo de Liang subestima o albedo em 9%, com $R^2=0,98$, $MAE=0,02$ e $RMSE=0,03$, enquanto o de Tasumi subestima em 16% com $R^2=0,98$, $MAE=0,03$ e $RMSE=0,03$. Assim, na aplicação de modelos de balanço de energia para a cana-de-açúcar, o modelo de Liang se mostra mais adequado, pois proporciona resultados mais consistentes e permite uma modelagem mais precisa do saldo de radiação, componente chave para bons resultados na modelagem do balanço de energia.

Outra opção para otimizar a estimativa do albedo da superfície seria ajustar o modelo de média ponderada das bandas espectrais para essa área de estudo, porém esse modelo não seria válido para outras localidades e tipos de

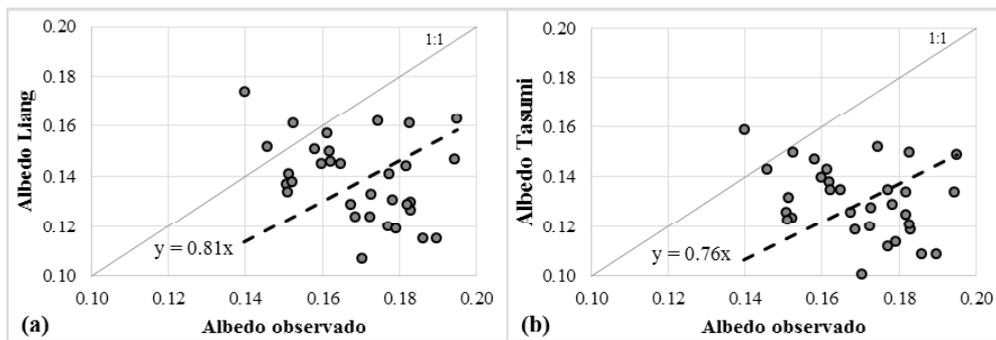


Fig. 6 - Comparação das estimativas de albedo com o albedo medido em campo na área de cana-de-açúcar, segundo os modelos de (a) Liang (2000) e (b) Tasumi et al. (2008), para as safras 2005/06 e 2006/07. A linha em diagonal representa a relação 1:1. A origem da regressão foi forçada para o zero, de forma a comparar os valores estimados com os observados.

cobertura da terra.

4. CONCLUSÕES

O albedo de superfície apresentou variabilidade sazonal de acordo com o desenvolvimento da cultura, respondendo as alterações biofísicas da cana-de-açúcar no campo, além de se mostrar sensível à incidência de precipitação, conforme relatado na literatura. Os dois modelos utilizados para simular o albedo de superfície subestimaram essa variável, sendo interessante buscar uma adaptação dos pesos relacionados a cada banda na média ponderada para se estimar o albedo sobre a cana-de-açúcar, embora isso limite a aplicabilidade do modelo ajustado à situação de campo do presente trabalho.

As superestimativas obtidas durante o período chuvoso podem ser decorrentes de contaminação do *pixel* MODIS com nebulosidade, o que aumenta a reflectância medida pelo sensor e, por consequência, o albedo estimado com esses dados. Foi verificada ainda uma evidência do efeito do ângulo de visada no albedo estimado, com valores maiores de albedo quando a direção de visada está no retro-espalhamento, condição em que o sensor capta maior reflectância da superfície.

Entre os dois modelos avaliados, o de Liang apresentou melhor desempenho, sendo entre os dois a melhor opção para alimentar modelos de balanço de radiação e balanço de energia, aplicação que será avaliada em trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro, ao INPE

pelo espaço físico e recursos computacionais, ao Dr. Humberto Rocha e ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo pelos dados disponibilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; KJAERGAARD, J. H. (2010) **METRIC - Mapping Evapotranspiration at High Resolution**, Application Manual. Idaho: Idaho University, 2010. 175p.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. **Journal of irrigation and drainage**. V.133, n.4, p. 380-394, 2007.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) advanced training and user's manual - Idaho implementation**. Idaho: Idaho University, 2002. 98 p.

ALLEN, L. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO Irrigation and drainage paper 56), 1998. 300p.

ANDRADE, R. G. **Aplicação do algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada da cana-de-açúcar**. 2008. 164 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa – MG, 2008.

ANDRÉ, R. G. B.; MENDONÇA, J. C.;

- MARQUES, V. S.; PINHEIRO, F. M. A.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: Balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, p. 375-382, 2010.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. 1995. 273 p. Tese (Ph.D.) - Wageningen Agricultural University, Wageningen, 1995.
- CABRAL, O. M. R.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H.; LIGO, M. A. V.; TATSCH, J. D.; FREITAS, H. C.; BRASILIO, E. Water use in a sugarcane plantation. **GCB Bioenergy**, v. 4, n. 5, p. 555-565, 2012.
- CENTRO DE PESQUISA METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA (Cepagri). **A classificação climática de Koeppën para o estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.cepagri.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em: 08 jan. 2014.
- DOMINGUES L. M.; ROCHA, H. R.; CABRAL, O.; TATSCH, J. D.; FREITAS, H. Padrões micrometeorológicos da plantação de cana-de-açúcar. In: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Guarapari, 2011. **Anais**. CD-ROM, 2011.
- DORAISWAMY, P.C.; HATFIELD, J.L.; JACKSON, B.; AKHMEDOV, B.; PRUEGER, J.; STERN, A. Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v.92, p.548-559, 2004.
- ESTEVES, B. S.; SOUSA, E. F.; MENDONÇA, J. C.; LOUSADA, L. L.; MUNIZ, R. A.; SILVA, R. M. Variações do albedo, NDVI e SAVI durante um ciclo da cana-de-açúcar no Norte Fluminense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, V. 7, n.4, p. 663-670, 2012.
- GEORGESCU, M.; LOBELL, D. B.; FIELD, C. B.; MAHALOV, A. Simulated hydroclimatic impacts of projected Brazilian sugarcane expansion. *Geophysical Research Letters*, v. 40, n. 5, p. 972–977, 2013.
- GOLTZ, E. **Avaliação do produto MOD09 (Reflectância da superfície) fornecido pelo sensor MODIS/Terra através de radiometria de campo em uma área de soja**. 2009. 133 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- GOMES, H. B. **Balanços de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e cerrado no Estado de São Paulo mediante imagens orbitais**. 2009. 108p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- HE, T.; LIANG, S.; WANG, D.; WU, H.; YU, Y.; WANG, J. Estimation of surface albedo and directional reflectance from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 119, n. 1, p. 286-300, 2012.
- HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of environment**, v. 25, p.295-309, 1988.
- JIA, L.; SU, Z.; VAN DEN HURK, B.; MENENTI, M.; MOENE, A.; DE BRUIN, H.; YRISARRY, J.; IBANEZ, M.; CUESTA, A. 2003. Estimation of sensible heat flux using the surface energy balance system (SEBS) and ATSR measurements. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**. v.28, n.1-3, p.75–88, 2003.
- LIANG, S.; FANG, H.; CHEN, M.; SHUEY, C. J.; WALTHALL, C.; DAUGHTRY, C.; MORISSETTE, J.; SCHAAF, C., STRAHLER, A. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: methods and preliminary results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 149–162, 2002.
- LIANG, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 76 n.1, p. 213–238, 2000.
- LIESENBERG, V., GALVÃO, L. S., PONZONI, F. J. Variations in reflectance with seasonality and viewing geometry: Implications for classification of Brazilian savanna physiognomies with MISR/Terra data. **Remote Sensing of Environment**, v.107, n.1-2, p.276-286. 2007.
- LOARIE, S. R.; LOBELL, D. B.; ASNER, G. P.; MU, Q.; FIELD, C. B. Direct impacts on

- local climate of sugar-cane expansion in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 1, n. 2, p. 105-109, 2011.
- LOPES, P.M.O.; VALERIANO, D. M. Validação do albedo da superfície terrestre obtido dos dados do sensor MODIS em regiões montanhosas. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis, Brasil, **Anais**. p 2805-2812, 2007.
- MANUAL DO LICOR 200X – **Instruction Manual - LI200X Pyranometer Revision: 6/10**. Disponível em <<http://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/li200x.pdf>> Acesso em 22 jan. 2014.
- MATOS, R. C. M.; CANDEIAS, A.L.B.; TAVARES JUNIOR, J.R. Mapeamento da vegetação, temperatura e albedo da Bacia Hidrográfica do Pajeú com imagens MODIS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.65, p.139-160, 2013.
- MATTAR, C.; FRANCH, B.; SOBRINO, J.A.; CORBARI, C.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C.; OLIVERA-GUERRA, L.; SKOKOVIC, D.; SORIA, G.; OLTRA-CARRIO, R.; JULIEN, Y.; MANCINI, M., Impacts of the broadband albedo on actual evapotranspiration estimated by S-SEBI model over an agricultural area. **Remote Sensing of Environment**, v.147, p.23–42, 2014.
- MAYER D. G.; BUTLER D. G. Statistical validation. **Ecological Modelling**, v.68, p.21–32, 1993.
- MINNIS, P., MAYOR, S.; SMITH JR., W. L.; YOUNG, D. F. Asymmetry in the diurnal variation of surface albedo. **IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing**. v. 35, n.4, p. 879-891, 1997.
- OKE, TR. **Boundary Layer Climates**. 2nd. Ed. Methuen, 289p., 1987.
- OLIVEIRA, G; MORAES, E. C.; RUDORFF, B.F.T. Balanço de radiação em áreas de expansão da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo com uso de dados orbitais MODIS/AQUA. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, p. 419-431, 2014.
- PAIVA, C. M.; TSUKAHARA, R. Y.; FRANÇA, G. B.; NICACIO, R. M. Estimativa da evapotranspiração via sensoriamento remoto para fins de manejo de irrigação. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento, Curitiba, 2011. **Anais**. p. 101-107,2011.
- PAPE, M.; VOHLAND, M. A comparison of total shortwave surface albedo retrievals from MODIS and TM data. In: ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, 2010, Vienna, **Proceedings...**, Viena: IAPRS, 2010, p.447-451.
- PEREIRA, G.; CARDOZO, F. S.; MORAES, E. C.; PRADO, B. R.; SILVA, G. B. S.; ARAI, E. Estudo preliminar do impacto do cultivo da cana-de-açúcar: alterações no albedo e liberação de energia radiativa através das queimadas. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, 2009. **Anais**. p. 325-332, 2009.
- PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S.L., COUTO, P., STUHLMANN, R.; COLLE, S. Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil. **Solar Energy**, v. 68, n. 1, p. 91-107, 2000.
- QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; MARIANO, G. L. Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zenital na região amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 42-49, 2006.
- ROCHA, H. R. **Relações Funcionais de Clima e Biosfera no Brasil**. 2004. 79p. Tese(Livre Docência) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D.A.; SILVA, W.F.; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.
- RUHOFF, A. L. **Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais**. 2011. 162p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- SU, Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.6, n.1, p.85-99, 2002.
- TASUMI, M.; ALLEN, R.; TREZZA, R. At-surface reflectance and albedo from satellite for

operational calculation of land surface energy balance. **Journal of Hydrologic Engineering**, n. February, p. 51–63, 2008.

TATSCH, J. D. **Uma análise dos fluxos de superfície e do microclima sobre Cerrado, Cana-de-açúcar e Eucalipto, com implicações para mudanças climáticas regionais**. 2006, 132p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

VERMOTE, E.F.; VERMEULEN, A. **Algorithm technical background document –Atmospheric correction algorithm: Spectral**

reflectance (MOD09). Maryland: University of Maryland, abr. 1999. 107 p. (NAS5-96062)

VERMOTE, E.; TANRÉ, D.; DEUZÉ, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J. J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, p. 675-686, 1997.

WANG, S.; DAVIDSON, A. Impact of climate variations on surface albedo of a temperature grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.142, n.2-4, p.133-142, 2007.