

USO DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ESTIMAR O SALDO DE RADIAÇÃO EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR E CERRADO

Pedro Rogerio Giongo¹, Geber Barbosa de Albuquerque Moura², Ana Paula Nunes da Silva³, Sergio Ricardo Rodrigues de Medeiros⁴

RESUMO – Este estudo objetivou estimar o saldo de radiação (Rn) à superfície terrestre usando imagens do Thematic Mapper (TM) do satélite LANDSAT 5 e validá-lo com dados de duas torres micrometeorológicas localizadas em região de cerrado e a outra em cana-de-açúcar. A área de estudo fica localizada no município de Santa Rita do Passa Quatro – SP, Brasil. Para a pesquisa foram obtidas seis imagens Landsat 5 - TM, na órbita 220 e ponto 75, nas datas de 22/02, 11/04, 29/05, 01/08, 17/08 e 21/11 todas do ano de 2005. Foram obtidas a calibração radiométrica, reflectividade, índices de vegetação, emissividades e outras operações, segundo procedimentos do SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), para posteriormente ser geradas as cartas de saldo de radiação. Observou-se alta correlação entre o saldo de radiação estimado e aqueles medidos nas estações de superfície nas áreas de cana-de-açúcar e cerrado, com coeficientes de correlação de 0,994 e 0,984, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: Radiação atmosférica, SEBAL, Sensoriamento remoto, LANDSAT-TM.

USE OF REMOTE SENSING TO ESTIMATE THE NET RADIATION IN AREAS OF SUGAR CANE AND SAVANNA

ABSTRACT - This study aimed to estimate net radiation from the land surface sensor using Thematic Mapper (TM) satellite LANDSAT 5 and compare with data from two agrometeorological stations located in the region of cerrado, and the other in sugar cane. The study area is located in the city of Santa Rita do Passa Quatro - SP, Brazil. For the research had been gotten six orbital pictures from the satellite Landsat 5 TM sensors in orbit 220 in point 75, the dates of 22/02, 11/04, 29/05, 01/08, 17/08 and 21/11 all of the year 2005. The radiometric calibration, reflectivity, indices of vegetation, emissivities and other operations had been gotten, according to procedures of the SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), later to be generated the pictures of net radiation. High correlation was observed enters the net radiation and those measured in the stations of surface in areas of sugar cane and savanna, with coefficients correlation of 0,994 and 0,984, respectively.

KEYWORDS: Atmospheric radiation, SEBAL, Remote sensing, LANDSAT-TM

¹Professor de Engenharia Agrícola, UEG, Via Protestado Joaquim Bueno, nº. 945 - Perímetro Urbano. Santa Helena de Goiás – GO. CEP 75920-000. E-mail: pedro.giongo@ueg.br (autor correspondente); ²Professor Adjunto do DEPA-UFRPE, Av. Dom Manoel de Medeiros s/n, Dois Irmãos, CEP 52171-900, Recife, PE. E-mail: geber@depa.ufrpe.br; ³Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, Bra. apns@ymail.com; ⁴Departamento de Biossistema da ESALQ, Piracicaba – SP, Bra. srrdmede@esalq.usp.br

1. INTRODUÇÃO

A energia solar é fonte de uma grande maioria dos processos naturais e biofísicos que ocorrem próximo a superfície terrestre, seja de forma direta à ação da luz ou da sua fonte de calor, bem como o aproveitamento de muitas formas para as plantas e seres vivos. O estudo dessa fonte de energia é indispensável para entender e quantificar mais eficientemente os processos (GIONGO et al., 2010).

Segundo Silva et al. (2005a), o saldo de radiação (R_n) é de fundamental importância nos processos de troca de calor e massa na baixa troposfera, uma vez que se constitui no principal elemento responsável pelo aquecimento do solo, do ar e, principalmente pela evapotranspiração da vegetação e das culturas. Ainda para melhor estudar as necessidades das culturas através das variáveis climáticas (ANDRADE JÚNIOR et al., 2005; ANDRADE JÚNIOR et al., 2009).

O saldo de radiação varia temporal e espacialmente, dependendo das características biofísicas da superfície analisada, de acordo com seu albedo, da irradiância solar global, das condições de temperatura, umidade da superfície e do ar. Muitas aplicações na agricultura e modelos de estimativa de evapotranspiração (ET) precisam de informações referentes ao saldo de radiação, sejam em valores médios diários ou de ciclo diurnos, para aplicações pontuais ou em escala regional, onde nesta, é necessário o uso de técnicas de sensoriamento remoto e/ou de sistema de informação geográfica (SIG), (SOUZA e SILVA, 2005; SOUZA et al., 2008; LOPES et al., 2008).

Os métodos de obtenção do R_n pontual como estações meteorológicas se restringem a pesquisa ou aplicações localizadas e, não refletem bem a uma realidade conhecida quando, se pretende estudar áreas heterogêneas, como o caso de bacia hidrográfica inteira.

Diante da necessidade de espacializar as informações, as técnicas de geoprocessamento e sistema de informação geográfica são de fundamental importância (BARBOSA et al., 2005). Essas técnicas nos últimos anos têm assumido grande importância no monitoramento de diversos fenômenos meteorológicos e ambientais, oferecendo suporte às previsões de tempo, melhor entendimento das mudanças climáticas e de preservação ambientais, destacando a melhoria e aplicações dos algoritmos e/ou modelos matemáticos que complementam o sensoriamento remoto.

Exemplo da aplicação de um algoritmo é o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*) e, têm gerado muitos trabalhos no âmbito de suprir uma demanda de estudos da agrometeorologia, como aplicações na estimativa do saldo de radiação, balanço de energia e, por conseguinte, determinar a evapotranspiração em escala regional. Este algoritmo foi proposto por Bastiaanssen (1995), e validado com campanhas experimentais na Espanha e no Egito. O mesmo tem sido aplicado em vários locais do mundo, como na Argentina, Estados Unidos, Israel, Brasil, dentre outros países.

Este trabalho objetivou estimar o saldo de radiação à superfície usando dados do sensor Thematic Mapper (TM) do satélite LANDSAT 5 e a validação dos resultados mediante observações realizadas em duas torres micrometeorológicas localizadas em

plântio de cana-de-açúcar e cerrado, no Estado de São Paulo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo do presente trabalho compreende uma região do município de Santa Rita do Passa Quatro, Estado de São Paulo, onde na Figura 1 encontra-se um recorte de uma imagem da

área de estudo com destaque para a localização das duas estações agrometeorológicas. Uma na área de cana-de-açúcar (USR), ($21^{\circ}38'13''$ S e $47^{\circ}47'25''$ W), e outra no cerrado (PDG), ($21^{\circ}37'9''$ S e $47^{\circ}37'56''$ W) ainda na Figura 1, da destaque a área do lago com coordenada de latitude $21^{\circ}36'22''$ S e longitude $47^{\circ}47'54''$ W.

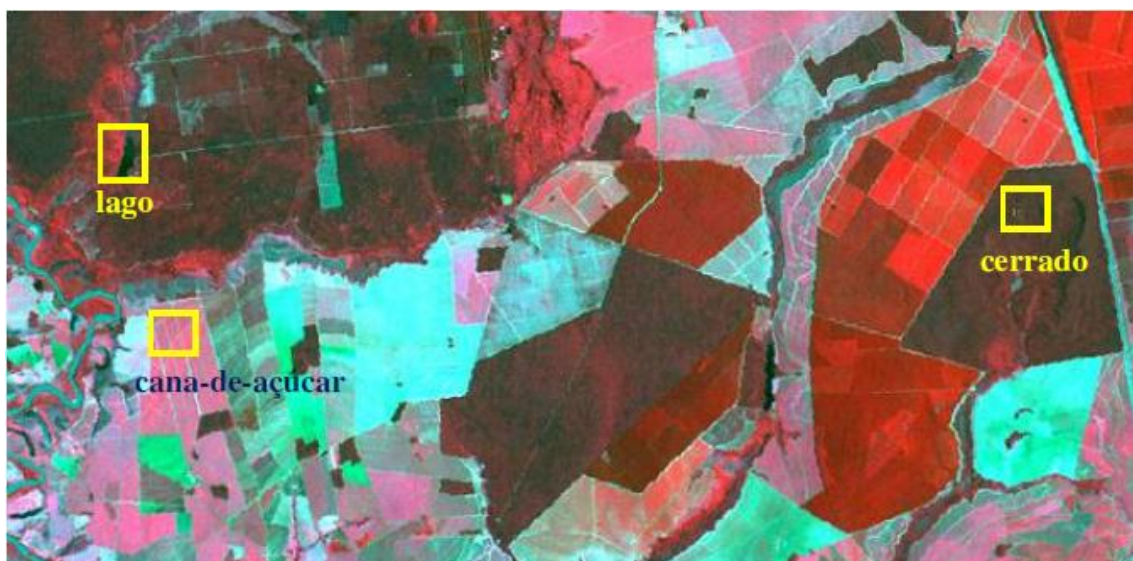


Figura 1. Imagem do dia 22/02/2005 composição colorida das bandas RGB 432, do satélite LANDSAT 5 – TM e, localização das estações agrometeorológica na área de estudo.

Para a realização deste estudo foram obtidas imagens em dias de céu claro, na órbita 220 ponto 75, correspondentes a seis (6) dias que são: 22/02, 11/04, 29/05, 01/08, 17/08 e 21/11 todas do ano de 2005, os quais neste trabalho foram tomados como dia seqüencial do ano (DS) 53, 101, 149, 213, 229 e 325, respectivamente. As imagens do Landsat 5 - TM foram adquiridas junto ao

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), órgão ligado ao Ministério da Ciência e Tecnologia.

As imagens Landsat/5 - TM são compostas de sete bandas espectrais, cujas características estão presentes na Tabela 1, onde também nesta, estão incluídas a irradiância solar monocromática (k_{λ_i}) das bandas reflectivas (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7),

incidente sobre uma superfície normal à terrestre, à distância de uma Unidade direção dos raios solares no topo da atmosfera Astronômica (UA) do Sol.

Tabela 1. Descrição das bandas do TM do Landsat 5, com os correspondentes intervalos de comprimento de onda, coeficientes de calibração (radiância mínima – a e máxima – b) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (T_{OA})

Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Coeficientes de Calibração ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$)		Irradiância Espectral no T_{OA} ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$)
		a	b	
1 (azul)	0,45 – 0,52	-1,52	193,0	1957
2 (verde)	0,52 – 0,60	-2,84	365,0	1826
3 (vermelho)	0,63 – 0,69	-1,17	264,0	1554
4 (IV-próximo)	0,76 – 0,90	-1,51	221,0	1036
5 (IV-médio)	1,55 – 1,75	-0,37	30,2	215,0
6 (IV-termal)	10,4 – 12,5	1,2378	15,303	-
7 (IV-médio)	2,08 – 2,35	-0,15	16,5	80,67

Fonte: Chander; Markham, (2003)

Foi ainda obtido o modelo de elevação digital do terreno (DEM), junto ao site do NASA (2007) referente ao mosaico $x = 27$ e $y = 17$. Após aquisição do arquivo referente ao local de estudo, o mesmo foi reamostrado para resolução de $30\text{ m} \times 30\text{ m}$, uma vez que o mesmo é disponibilizado com a resolução de $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ o pixel.

O sensor TM mede a radiância espectral dos alvos e os armazena na forma de níveis de cinza, intensidade do pixel, ou ainda número digital (ND), cujos valores variam de 0 a 255 (8 bits), tendo uma resolução espacial de 30 m nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, e 120 m na banda 6. Dessa forma, para a visualização e realização de operações matemáticas intra e inter bandas, recortes, classificação e outras operações, foi utilizado o software ERDAS Imagine 8.7.

Radiância espectral

Para o cômputo da radiância espectral de cada banda (L_{λ_i}), ou seja, a efetiva calibração radiométrica, foi realizada a

conversão do número digital (ND) de cada pixel da imagem em radiância espectral monocromática. Essas radiâncias representam a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medida ao nível do satélite Landsat, para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7. Já para a banda 6, essa radiância representa a energia emitida por cada pixel, segundo a equação 1 proposta por Markham e Baker (1987).

$$L_{\lambda_i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} \text{ND} \quad (1)$$

onde a e b são as radiâncias espectrais mínimas e máximas ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$, Tabela I); ND é a intensidade do pixel (número digital – número inteiro de 0 a 255); e i corresponde as bandas 1, 2, 3,... e 7 do satélite Landsat 5 - TM.

Refletividade

A refletância monocromática de cada banda (ρ_{λ_i}) é dada pela razão entre o fluxo de radiação solar refletido e o fluxo de radiação solar incidente, que é obtida segundo a equação 2 (ALLEN et al., 2002).

$$\rho_{\lambda_i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda_i}}{k_{\lambda_i} \cdot \cos Z \cdot dr} \quad (2)$$

onde L_{λ_i} é a radiância espectral de cada banda, k_{λ_i} é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$), Z é o ângulo zenital solar e dr é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol (em unidade astronômica), escrita na equação 3 (IQBAL, 1983).

$$dr = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{DJ2\pi}{365}\right) \quad (3)$$

O cosseno do ângulo zenital foi obtido pela equação 4.

$$\cos Z = \cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) \quad (4)$$

onde E é o ângulo de elevação do Sol, obtido no cabeçalho de cada imagem.

Albedo Planetário

O albedo planetário (α_{toa}) representa o albedo não ajustado a transmissividade atmosférica, que é obtida pela combinação linear das refletâncias monocromáticas segundo equação 5.

$$\alpha_{toa} = 0,293\rho_1 + 0,274\rho_2 + 0,233\rho_3 + 0,157\rho_4 + 0,033\rho_5 + 0,011\rho_7 \quad (5)$$

Onde: $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5$ e ρ_7 são as refletâncias das bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, respectivamente.

Albedo da Superfície

Após a obtenção do albedo planetário fez-se o cômputo do albedo da superfície ou albedo corrigido para os efeitos atmosféricos α , pela equação 6.

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2} \quad (6)$$

onde α_{toa} é o albedo planetário, α_p é a da radiação solar refletida pela atmosfera, que varia entre 0,025 e 0,04, mas para este estudo usou-se o valor de 0,03, com base em recomendações de Bastiaanssen (2000) e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica, que para condições de céu claro, proposta por Allen et al. (2007) e pode ser obtida pela equação 7.

$$t_{sw} = 0.35 + 0.627 * EXP\left[\frac{-0.00146P}{k_t \cos Z} - 0.075\left(\frac{W}{\cos Z}\right)^{0.4}\right] \quad (7)$$

onde P é a pressão atmosférica (KPa) obtida pela equação 8, k_t é um coeficiente de turbidez da atmosfera que tem valores de $0 < k_t \leq 1$, sendo que o valor de $k_t = 1$ é para ar limpo e, $k_t = 0$ é para extrema turbidez, sujo ou ar poluído (ALLEN et al., 2007), os valores de k_t para cada dia de imagem são escritos na Tabela 2, $\cos Z$ já foi definido

anteriormente e W é a água precipitável (no local da estação agrometeorológica) calculada pela equação 9 (GARRISON e ADLER, (1990).

Tabela 2. Valores de coeficiente de turbidez (k_t), atribuídos para cada dia, referente às imagens para Santa Rita do Passa Quatro – SP, no ano de 2005.

DS	53	101	149	213	229	325
k_t	1,0	1,0	0,6	0,4	0,4	0,6

Os valores de k_t , foram atribuídos para os dias das imagens baseado nos valores de concentração de CO₂ (ppm) obtidos na estação agrometeorológica localizada na área de estudo. Foram atribuídos, valores inferiores para k_t nos dias 213 e 229, mesmo que não houve aumento considerável na concentração de CO₂, pois se baseou nas condições atmosféricas que estavam mais turbulentas nesta época para a região de Santa Rita do Passa Quatro em geral, em função das queimadas ocorridas para o corte e colheita da cana-de-açúcar.

$$P = 101.3 \left(\frac{T_{ar} - 0.0065 * h}{T_{ar}} \right)^{5.26} \quad (8)$$

onde T_{ar} é a temperatura do ar (K°), h é a altitude média da superfície em relação ao nível médio do mar (m), que para este estudo considerou média de 600 m.

$$W = 0.14 * e_a * P_{air} + 2.1 \quad (9)$$

onde e_a é a pressão de vapor de água (KPa), e P_{air} a pressão atmosférica obtidas na estação agrometeorológica na área de estudo para cada dia referente as imagens.

As cartas de emissividades, temperatura de superfície, radiação de onda curta, radiação de onda longa incidente e

radiação de onda longa emitida, foram obtidas segundo procedimentos bem descritos em Silva et al. (2005b). Finalmente o saldo de radiação à superfície R_n (Wm^{-2}) foi computado utilizando-se a equação 10.

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_o) R_{L\downarrow} \quad (10)$$

onde $R_{s\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente; α é o albedo de superfície; $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa incidente na superfície; $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida pela superfície; e ϵ_o é a emissividade da superfície.

Após a obtenção dos valores de R_n de superfície gerados com as imagens do sensor TM, foram então comparados os valores absolutos do pixel de cada imagem, cuja coordenada geográfica fosse a mesma da torre da estação USR e PDG, onde os valores das estações de superfície, foram utilizados aqueles registros do mesmo horário da passagem do satélite.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 estão os valores estatísticos das cartas de R_n , para os dias de

estudo e, verificou-se que os menores mínimos de Rn foram obtidos nas cartas dos DS 149 (234,8) e 213 (240,5 W m⁻²) e, os maiores máximos foram obtidos nos dias DS 53 (689,9) e 325 (859,2 W m⁻²). A variação dos valores médios no período estudado foi de 383,3 a 733,7 W m⁻², obtidos nos DS 149 e 325, respectivamente.

Alguns estudos sugerem que a emissividade pode ser a maior fonte de erro nas estimativas de temperatura da superfície usando imagens de satélite (QUAIDRARI L L, 2002), fato que não ocorreu neste trabalho, mostrando assim a boa estimativa de e_o nos alvos estudados, segundo a literatura.

Tabela 3. Valores dos parâmetros estatísticos mínimo, máximo, médio, mediano, moda e desvio padrão da análise estatística das cartas de saldo de radiação em W m⁻².

DS	mínimo	máximo	médio	mediana	Moda	Desv.PAD
53	407,00	689,90	576,76	587,13	613,65	41,34
101	328,48	545,04	456,73	464,68	484,13	28,91
149	234,84	466,44	383,31	387,73	407,64	25,54
213	240,55	514,92	415,52	422,75	442,04	30,67
229	257,80	559,30	444,69	453,30	473,33	32,97
325	445,38	859,21	733,74	747,67	760,60	50,95

Foi observado que houve grande variação na amplitude dos saldos de radiação, entre as imagens em geral, Figura 2. Essa característica é comum uma vez que a área de estudo possui considerável heterogeneidade além de compor um ciclo anual de estudo, podendo ainda considerar que a fonte de energia solar incidente é determinante para gerir os valores de Rn anual. Diferente da região de Juazeiro – BA e Petrolina – PE onde, Silva L L. (2005b) encontraram Rn mínimo e máximo de 395,3 e 775,5 W m⁻² para o ano 2000 e 360,3 e 775,4 W m⁻² no ano de 2001.

Neste registrou os menores Rn em áreas de solos expostos e/ou pouco

vegetados, já os maiores Rn foram obtidos em superfícies do lago e ou do rio Mogi Guaçú, esse comportamento também foi observado por Silva L L. (2005b) que encontraram os maiores Rn em área no lago de sobradinho, com 751,3 W m⁻² e, os menores Rn obtidos em áreas de solo exposto.

Quanto à época do ano, a variação de Rn ficou marcada pelo fluxo de energia incidente na superfície, e para cada imagem, as variações foram características ao tipo de superfície do alvo, que altera o albedo da mesma e conseqüentemente o Rn que pode ser verificado na Figura 2.

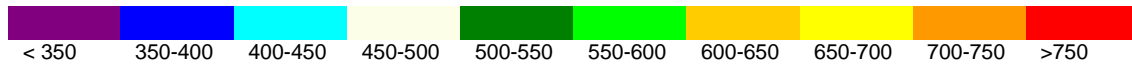


Figura 2. Cartas de saldo de radiação (W m^{-2}) referente os DS 53 (A), 101 (B), 149 (C), 213 (D), 229 (E) e 325 (F).

Querino L. L. (2006) citam que quanto maior o ângulo zenital, menor é a incidência de radiação global, devido ao caminho óptico que os raios solares têm que percorrer para chegar à superfície, fato que é verificado nas Figuras 2C e 2D, quando o sol esta mais distante da área de estudo.

Em áreas de maiores valores de albedo, como exemplo em destaque de coloração verde escuro na parte superior da Figura 3F, que registrou albedo superior a 27%, acabou resultando em classes de Rn inferiores, (500 a 550 W m^{-2}).

Na Figura 3 estão os histogramas de L. A frequência das cartas de Rn e, onde se verificou que todas apresentaram duas modas bem distintas onde as Figuras 3^a e 3B estão mais pronunciadas. A maior moda é proveniente de pixels localizados na área de cerrado, que na carta da Figura 3^a tem valor médio de 615 W m^{-2} , na Figura 3B é de 483 W m^{-2} , na Figura 3C é de 407 W m^{-2} , na Figura 3D é de 441 W m^{-2} , na Figura 3E é 472 W m^{-2} e na Figura 3F essa média chega a 763 W m^{-2} .

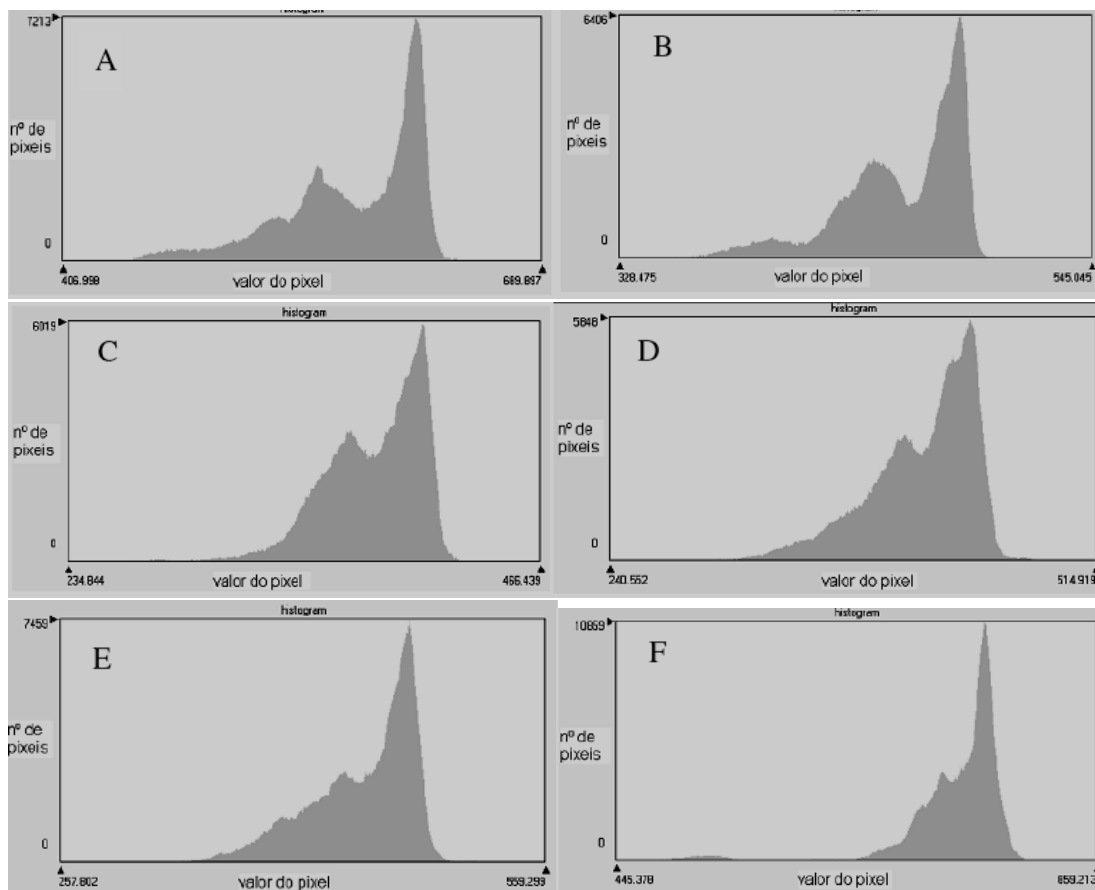


Figura 3. Histograma de frequência das cartas de saldo de radiação para os dias 53 (A), 101 (B), 149 (C), 213 (D), 229 (E) e 325 (F).

A menor moda é gerada por pixels localizados em áreas de eucalipto e aquelas adjacentes a área de cerrado Figura 1 e, que na Figura 3^a essa moda apresentou média de 554 W m^{-2} , na Figura 3B é de 444 W m^{-2} , na Figura 3C é 372 W m^{-2} , na Figura 3D é 405 W m^{-2} , na Figura 3E é 431 W m^{-2} e na Figura 3F a moda intermediária de 723 W m^{-2} , ainda na mesma Figura 3F aparece uma terceira moda, pouco pronunciada mas

bem distinta e originada daqueles pixels da área de solo exposto com valor médio de 513 W m^{-2} .

Para avaliar melhor o desempenho da metodologia proposta para o Rn foram realizados recortes de áreas homogêneas, sendo então extraídos recortes com tamanho de 20 a 30 pixels das áreas representativas do lago, da cultura da cana-de-açúcar e do cerrado, conforme a Figura 1.

Na Figura 4^a, é possível verificar os valores médios de Rn para o recorte da área do lago, onde a média é crescente a partir dos DS 149, 213, 101, e 229, porém, bem inferiores aos DS 53 e 325. Para os valores de Rn na área do lago, foi observado que os menores mínimos foram registrados nos DS 149 (450,2) e 101 (487,7 W m⁻²), já os maiores máximos foram nos DS 325 (856,4) e 53 (685,3 W m⁻²).

A variação média de Rn no lago foi de 461,2 (149) a 837,6 W m⁻²(325), concordando com os obtidos por Silva L. L. (2005b), onde no lago de Sobradinho e leito do rio São Francisco foi obtido 751,3 e 750 W m⁻² de Rn nos meses de outubro e novembro de 2000 e 2001, respectivamente.

Em todas as imagens estudadas, verificou que os maiores Rn foram oriundos de superfícies do lago ou do rio Mogi Guaçu, essa característica também foi observada na região norte fluminense, por Mendonça (2007) que registrou Rn sempre superiores em superfícies de água, com variação anual entre 410 a 820 W m⁻², muito semelhante a encontrada neste estudo.

Na Figura 4B, estão os valores médios de Rn, do recorte na área de cana-de-açúcar e, onde foi registrado baixa variação dos valores de Rn nesta área, observa uma tendência crescente dos valores médios dos DS 213, 229, 149 e 101, com valores de médias mais próximos, em seguida os DS 53 e 325,

com médias bem superiores aos DS citados anteriormente.

Na área de cana-de-açúcar os valores mínimos de Rn foi registrado nos DS 213 (351,4) e 149 (385,8 W m⁻²), e os maiores máximos foram obtidos nos DS 325 (731,1) e 53 (557,8 W m⁻²), enquanto que a variação média no período foi de 361,9 a 725,8 W m⁻², obtido nos DS 213 e 325, respectivamente.

Ainda Mendonça (2007) arbitrou Rn em áreas de cana-de-açúcar valores de 657,61 a 335,38 W m⁻² para os DS 36 e 186, respectivamente, com imagens MODIS, e esses valores estão bem próximos aos obtidos neste trabalho, para o mesmo período do ano.

Na Figura 4C, estão as médias de Rn do recorte na área de cerrado e, verifica uma pequena variação. Foi possível ainda notar uma sequência crescente dos valores para os DS 149, 213, 229 e 101, com médias entre 406,9 a 482,5 W m⁻², enquanto que nos DS 325 e 53 verifica médias de 842,1 e 617,3 W m⁻², respectivamente.

Na área de cerrado, os valores mais inferiores de Rn foram registrados nos DS 149 (402,7) e 213 (431,5 W m⁻²), já os superiores foram obtidos nos DS 325 (856,4) e 53 (624,1 W m⁻²). Enquanto que a variação média no período foi de 407,1 a 842,1 W m⁻², e registrado nos DS 149 e 325, respectivamente, comportamento que, é característico a todos os tipos de alvos estudados, em um período de pelo menos um ciclo anual.

Na Figura 5, estão correlações entre os valores do Rn instantâneo mensurado pelo saldo radiômetro das estações USR e PDG com o Rn estimado pelo SEBAL, referente aos píxeis com a mesma localização das estações.

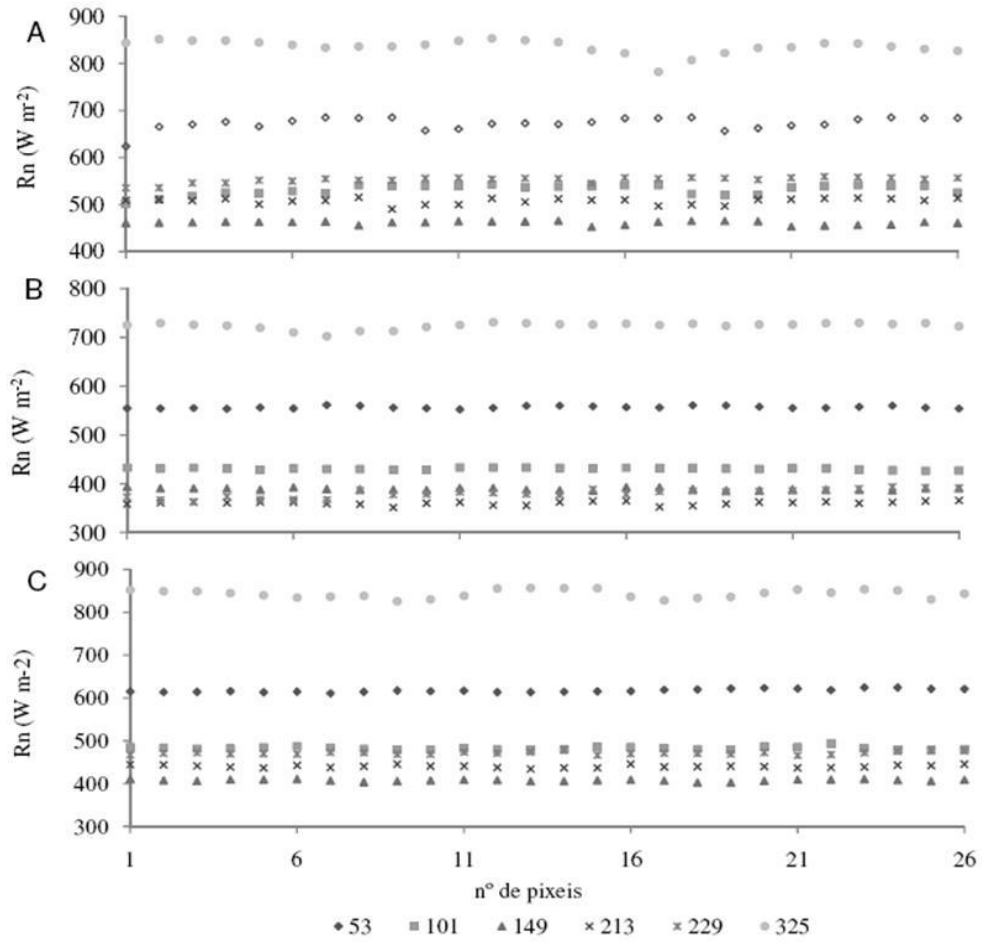


Figura 4. Valores do Rn dos píxeis do recorte na área do Lago (A), de cana-de-açúcar (B) e de cerrado (C) para os DS referente às imagens.

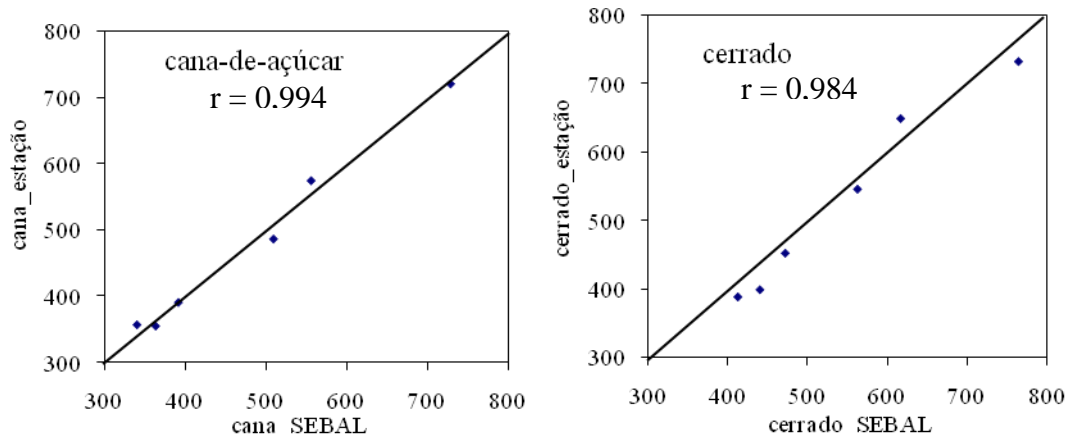


Figura 5. Correlação entre os valores do saldo de radiação, em $W\ m^{-2}$ medido e estimado com o SEBAL nos píxeis das estações da cana-de-açúcar e cerrado.

Houve correlação de 0,994 e 0,984, para o R_n registrados nas torres USR e PDG e o estimado pelo algoritmo SEBAL, no pixel correspondente a cada torre. Os registros enfatizam a eficiência do algoritmo aos valores estimados e, aqueles registrados à superfície.

Entre R_n estimado pelo algoritmo SEBAL e medido a superfície, Mendonça (2007), conseguiu em área de cana-de-açúcar R^2 de 0,97 e 0,95, quando utilizou as metodologias para estimativa de albedo MODIS e Tasumi L L. (2008), respectivamente.

Ainda Tasumi L L. (2008), em estimativa de R_n de 49 localidades dos Estados Unidos da América, observaram

uma correlação média de 95 % entre os valores medidos e estimados pelo algoritmo SEBAL, também Di Pace L L. (2008), obteve boas estimativas de R_n estimado e medido a superfície no nordeste brasileiro, dados que corroboram com os obtidos neste estudo.

Segundo Daughtry L L. (1990) o erro médio entre medições e estimativas de R_n com sensoriamento remoto são inferiores a 7 %. Essa afirmação pode ser verificada na Tabela 4, com pequenos erros para as duas estações, verificando assim que, a proposta do algoritmo SEBAL, para estimativa de R_n para áreas de cerrado e cana-de-açúcar, alcançou valores muito consistentes e satisfatórios na aplicação.

Tabela 4. Valores do saldo de radiação registrados nas duas estações agrometeorológica e os obtidos pelo modelo SEBAL, com os erros relativos.

DS	cana-de-açúcar ($W m^{-2}$)			cerrado ($W m^{-2}$)		
	SEBAL	Superfície	Erro Relativo (%)	SEBAL	Superfície	Erro Relativo (%)
53	555,5	574,6	-3,3	615,9	649,7	-5,2
101	508,9	486,4	4,6	561,8	546,5	2,8
149	340,1	356,8	-4,7	412,0	389,1	5,9
213	363,1	354,9	2,3	439,6	399,7	10,0
229	391,2	390,5	0,2	471,3	453,1	4,0
325	728,1	720,8	1,0	763,7	733,1	4,2

Os erros relativos para a área de cana-de-açúcar foi entre 0,2 a 4,7%, enquanto que na área de cerrado os erros foram entre 2,8 a 10 %, o que evidencia a alta precisão do algoritmo para essas aplicações. Os maiores erros em áreas de cerrado, podem ser oriundos da heterogeneidade de cobertura neste tipo de superfície onde ocorre eventuais descontinuidades, propiciando um pixel misto.

Também Mendonça (2007) encontrou erros entre 1 a 95 $W m^{-2}$, em área de cana-de-açúcar na região norte fluminense com imagens MODIS, onde a média de erro foi pouco superior aos obtidos nesta pesquisa.

4. CONCLUSÕES

A metodologia proposta para calibrações radiométricas foi muito consistente para imagens Landsat 5 - TM neste estudo onde, os erros relativos associados à obtenção de R_n são em geral inferiores a 5%.

O algoritmo SEBAL estimou, satisfatoriamente, os valores de saldo de radiação para superfícies sobre áreas de cerrado e de cana-de-açúcar, na região de Santa Rita do Passa Quatro - SP,

consistentes com observações realizadas do saldo de radiação à superfície.

A estimativa do R_n em escala regional, se faz necessário para áreas heterogêneas e agrícolas, para realização de trabalhos posteriores, como estimativa de balanço de energia e evapotranspiração.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) - Advanced Training and Users Manual** - Idaho Implementation, v.1.0, 2002.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. v.133, n.4, p.380-394. 2007.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; BARROS, A. H. C.; SILVA, C. O.; GOMES, A. A. N. Classificação climática e regionalização do semi-árido do Estado do Piauí sob cenários pluviométricos distintos. **Revista Ciência Agronômica**, v.36, n.2, p.143-151. 2005.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SILVA, F. A. M.; LIMA, M. G.; AMARAL, J. A. B. Zoneamento de aptidão climática para o algodoeiro herbáceo no Estado do Piauí. **Revista Ciência Agronômica**, v.40, n.2, p.175-184, 2009.
- BARBOSA, F. C.; TEIXEIRA, A. S.; GONDIM, R. S. Espacialização da evapotranspiração de referência e precipitação efetiva para estimativa das necessidades de irrigação na região do baixo Jaguaribe - CE. **Revista Ciência Agronômica**, v.36, n.1, p.24 - 33., 2005.

- BASTIAANSSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate.** 1995. 272p. PhD. Tesis, CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hidrology.** 229: p.87-100. 2000.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges. **Transactions on geoscience and remote sensing.** v.41, n.11, p.2674-2677. 2003.
- DAUGHTRY, C. S. T. et al. Spectral estimates of Net radiation and soil heat flux. **Remote Sensing of Environment.** v.32, p.111-124. 1990.
- DI PACE, F.T.D.; SILVA, B.B.; SILVA, V.P.R.; SILVA, S.T.A. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** Campina Grande, v.12, n.4, p.385-392, 2008.
- GARRISON, J. D.; ADLER, G. P. Estimation of precipitable water over the United State for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse coponents. **Solar Energy.** v.44, n.4, p.225-241. 1990.
- GIONGO, P. R.; MOURA, G. B. A.; SILVA, B. B.; ROCHA, H. R.; MEDEIROS, S. R. R.; NAZARENO, A. C. Albedo à superfície a partir de imagens Landsat 5 em áreas de cana-de-açúcar e cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v. 14, n. 3, p. 279-287, 2010.
- IQBAL M. **An Introduction to Solar Radiation.** New York: Academic Press. 1983. 212p.
- LOPES, F. B.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M.; AQUINO, D. N.; ARAÚJO, L. F. P. Mapa da qualidade das águas do rio Acaraú, pelo emprego do IQA e Geoprocessamento. **Revista Ciência Agronômica,** v.39, n.3, p.392-402, 2008.
- MARKHAM, B. L.; BARKER, J. L. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. **International Journal of Remote Sensing.** v.8, n.3, p.517-523. 1987.
- MENDONÇA, J. C. **Estimativa da evapotranspiração regional utilizando imagens digitais orbitais na região Norte Fluminense.** 2007. 145f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal), UENF Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro.
- NASA. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Disponível em: <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/listImages.asp>, no dia 18 de maio. 2007.
- QUADRARI, H. et al. Land surface temperature estimation from AVHRR thermal infrared measurements: In assessment for the AVHRR land Pathfinder II data Set. **Remote Sensing of Environment.** v.81, p.114-128. 2002.
- QUERINO, C. A. S. et al. Avaliação e comparação de Radiação solar Global e albedo com ângulo zênital na região amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia.** v.21, n.3. p.42-49. 2006.
- SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia.** v.13, n.2, p.201-211. 2005a.
- SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. **Revista Brasileira de Meteorologia.** v.20, n.2, p.243-252. 2005b.
- SOUZA, J. D., SILVA, B. B., CEBALLOS, J. C. Estimativa da radiação solar global à superfície usando um modelo estocástico: caso sem nuvens. **Revista Brasileira de Geofísica.** v.26, n.1, p.31-44 2008.
- SOUZA, J. D., SILVA, B. B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Geofísica.** v.23, n.4, p.349-358. 2005.
- TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. At-Surface Reflectance and Albedo from satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. **Journal Hydrologic Engineering.** v.13, n.2, p.51-63. 2008.