

Revista Brasileira de Cartografia (2014) N<sup>o</sup> 66/2: 233-244  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO SALDO DE RADIAÇÃO E DO FLUXO DE CALOR NO SOLO NO TERRITÓRIO DE ITAPARICA, NORDESTE DO BRASIL**

*Spatial Distribution of Net Radiation and Soil Heat Flux in the Territory of Itaparica, Northeastern Brazil*

**Helio Leandro Lopes<sup>1</sup> in memoriam, Bernardo Barbosa da Silva<sup>1</sup> & Admilson da Penha Pacheco<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade Federal de Pernambuco - UFPE**

**Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Civil - Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos**

Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, 50.740-530. Recife, PE - Brasil  
heliovasf@hotmail.com, bbdasila.ufpe@gmail.com

**<sup>2</sup>Universidade Federal de Pernambuco - UFPE**

**Centro de Tecnologia e Geociências - Departamento de Engenharia Cartográfica - Laboratório de Sensoriamento Remoto**

Rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, 50.740-530. Recife, PE - Brasil  
admilpp@ufpe.br

*Recebido em 22 de agosto, 2011/ Aceito em 27 de outubro, 2011  
Received on august 22, 2011/ Accepted on october 27, 2011*

### **RESUMO**

Há uma crescente necessidade de conhecimento dos processos físicos que envolvem as trocas de energia e massa entre a superfície e a atmosfera. Essas trocas dependem sobremaneira do uso e cobertura do solo. A compreensão quantitativa desses processos por meio de imagens de satélites pode ajudar no manejo e conservação dos recursos hídricos minimizando os impactos negativos decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais. Este trabalho teve como objetivo quantificar as trocas radiativas entre atmosfera e superfície por meio do saldo de radiação e do fluxo de calor no solo, em diferentes tipos de uso e cobertura do solo. A metodologia envolveu a modelagem e mapeamento de parâmetros físicos e biofísicos a partir de imagens MODIS e do algoritmo SEBAL em uma área com vegetação nativa e agricultura irrigada. Foi realizada uma visita à área em 2008 para georreferenciar diversos usos do solo. As coordenadas geográficas foram levantadas no centro de cada classe de cultivo irrigado para obter pixels puros nas imagens MODIS. Os resultados mostraram que há uma variação nos valores dos parâmetros estimados dentro dos diferentes tipos de cobertura do solo e principalmente entre classes de uso e cobertura de caatinga. A caatinga arbórea apresentou valor médio de fluxo de calor no solo ( $G_o$ ) de 124,9  $Wm^{-2}$ , enquanto áreas degradadas com ocorrência de erosão apresentaram valor médio de 132,6  $Wm^{-2}$ . Em lotes irrigados de cultivos de banana, coco e mamão foram encontrados valores médios de  $G_o$  de 103,8, 98,6 e 113,9  $Wm^{-2}$ , respectivamente. Em relação ao saldo de radiação instantâneo ( $R_n$ ), a caatinga arbórea apresentou valor médio de 626,1  $Wm^{-2}$ , enquanto que para caatinga secundária a média foi de 575,2  $Wm^{-2}$ . Áreas irrigadas de cultivos de banana, coco e mamão apresentaram  $R_n$  de 658,1, 647,4 e 617,9

Wm-2, respectivamente. Aplicando o modelo senoidal para espacializar o saldo de radiação médio diário (Rnmed), foi registrado em caatinga arbórea valor de 417,2 Wm-2 e em caatinga secundária valor de 379,9 Wm-2. Para os cultivos irrigados de banana, coco e mamão os valores de Rnmed foram de 430,9, 431,3 e 411,6 Wm-2, respectivamente. Foi possível aplicar o modelo senoidal para determinar o saldo de radiação máximo e médio diário considerando diversos usos e cobertura do solo; porém, há necessidade de comparação com dados de campo para validação deste modelo relacionado ao ecossistema caatinga e cultivos irrigados de forma a avaliar qualidade das estimativas de cada variável. Não foram aplicadas técnicas de desagregação, e a resolução espacial do pixel deve ser considerada em escala local de forma a obter melhores resultados.

**Palavras chaves:** Parâmetros Biofísicos, Uso e Cobertura do Solo, Modelo Senoidal, MODIS.

## ABSTRACT

There is an increasing need for knowledge on the daily physical processes that involves heat exchange between surface and atmosphere. The energy exchanges between surface and atmosphere depend mainly on land use and land cover. The quantitative understanding of this process by means of satellite imagery can help in the management and conservation of water resources while minimizing impacts due to improper use of environmental resources. This work has as aim to quantify the energy changes between atmosphere and surface by modeling both net radiation and soil heat flux related to land use and land cover. The methodology took into account modeling and mapping of physical and biophysical parameters using MODIS images and SEBAL algorithm in an area of native vegetation and irrigated crops. A field visit was carried out in 2008 in order to georeference several land uses. The geographic coordinates were obtained in the most central part of each irrigated crop to get pure pixels of the MODIS images. The results showed that there are variations in the values of the estimated parameters for different land cover types and mainly in caatinga cover. The dense caatinga showed mean values of soil heat flux ( $G_o$ ) of 124.9 Wm-2 while degraded caatinga with incidence of erosion, present average value of 132.6 Wm-2. For irrigated plots cultivated with banana, coconut and papaya the mean  $G_o$  values were 103.8, 98.6 and 113.9 Wm-2, respectively. With regard to the instantaneous net radiation (Rn), dense caatinga presented mean value of 626.1 Wm-2, while secondary caatinga a mean value of 575.2 Wm-2. Irrigated areas cultivated with banana, coconut and papaya presented Rn of 658.1, 647.4 and 617.9 W m-2, respectively. Applying the sinusoidal model for the spatial distribution of daily mean net radiation (Rnmean) it was found that dense caatinga had a mean value of 417.1 W m-2 while secondary caatinga had a mean value of 379.9 W m-2. For the irrigated crops of banana, coconut and papaya the Rnmean values were 430.9, 431.3 and 411.6 W m-2, respectively. It was found that the senoidal model to determine the maximum and daily mean net-radiation can be applied considering the diverse classes of land use and land cover; however, there is a need to compare the results with field data for validation of this model related to caatinga ecosystem and irrigated crops to evaluate the quality of the estimated variables. No downscaling method was applied and spatial resolution of pixels should be considerate at local scale to achieve better results.

**Keywords:** Biophysical Parameters, Soil Use and Soil Cover, Sinusoidal Model, MODIS.

## 1. INTRODUÇÃO

O SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) é um algoritmo que foi desenvolvido para estimativa dos componentes do balanço de energia (BE) e, por conseguinte, da evapotranspiração real, baseado em combinações de relações empíricas e parametrizações físicas (BASTIAANSEN et al., 1998a; b). Este algoritmo se utiliza apenas das radiâncias espectrais registradas em sensores de satélites e um conjunto mínimo de dados meteorológicos de superfície, entre os quais a velocidade do vento e a temperatura do ar, para solucionar o balanço radiativo e energético à superfície (COURALT et al., 2003). No SEBAL há necessidade de

dados de imagens digitais, que registram a radiação térmica infravermelha, além da radiação do visível e do infravermelho próximo, determinando o balanço energético da superfície pixel a pixel, numa base de tempo instantânea. Na sua rotina se calcula o saldo de radiação (Rn), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor no solo (G) para cada pixel (BASTIAANSEN, 1995). O fluxo de calor latente (LE) é adquirido como um valor residual da equação do balanço energético (BASTIAANSEN, 1995). Comparoé et al. (2008) afirmam que o SEBAL se destaca entre os demais algoritmos pelas seguintes razões: (a) Consiste em um algoritmo baseado fisicamente em análises de imagens de satélite e requer um

mínimo de informações meteorológicas; (b) Faz uso de um grande número de variáveis ambientais e não as assume constantes espacialmente como é feito em muitos outros métodos; (c) É reduzida a necessidade da correção atmosférica das informações em comprimentos de onda curta e térmica nas imagens, desde que a ET estimada dependa apenas de diferenças da temperatura radiométrica na cena em vez do valor absoluto da temperatura de superfície. Isto amplia a aplicabilidade do SEBAL uma vez que as medições necessárias para correções atmosféricas não estão frequentemente disponíveis. O uso do SEBAL tem a grande vantagem de proporcionar o balanço de energia à superfície de maneira efetiva e econômica, possibilitando grande cobertura espacial e, dependendo do sensor orbital que o alimenta com dados dos canais reflectivos e termais, pode também ter grande resolução espacial (SILVA et al., 2005).

O saldo de radiação (Rn) sintetiza a contabilidade dos fluxos radiativos descendentes e ascendentes, de onda curta e onda longa, que interagem com a superfície terrestre (SILVA et al., 2011). Rn é responsável pelos processos de evaporação, fotossíntese e aquecimento do solo e do ar (BISHT e BRAS, 2010).

Registros contínuos de saldo de radiação do planeta, em escala global e regional, foram inicialmente obtidos a partir de 1978 com o satélite Nimbus e, atualmente, com experimentos de Balanço de Radiação da Terra (ERBE - *Earth Radiation Budget Experiment*) e Sistema Radiante da Terra (CERES - *Earth's Radiant Energy System*), utilizando dados de múltiplos satélites (FERREIRA, 2004). Aguiar (2007) relata que a variação do Rn depende de diversas características da superfície como: cobertura e uso do solo, albedo, umidade e temperatura do solo, entre outras.

As componentes do balanço de radiação podem ser determinadas e espacializadas por técnicas de sensoriamento remoto, cujos sensores detectam a radiação solar refletida pela superfície em faixas espectrais que possibilitem a determinação do albedo e índices de vegetação, e também operam na banda termal, o que propiciaria o cômputo da temperatura da superfície. Muitos desses dados têm alta resolução espacial, porém possuem baixa resolução temporal quando comparado com observações de campo (BISHT

e BRAS, 2010). Devido ao aspecto espacial e facilidade de obter atributos da superfície da terra, muitos trabalhos objetivam estimar o saldo de radiação (com seus parâmetros de entrada) por meio da combinação de observações remotas com observações in loco (JACOBS et al., 2000; MA et al., 2002; SILVA et al., 2005; SILVA et al., 2011; TEIXEIRA, 2010).

Para estudos destinados à obtenção das componentes do balanço de energia, são realizados com maior frequência medições de Rn (AZEVEDO et al., 2003 e 2007; SILVA et al., 2007; ZHANG et al., 2008). Nesse sentido, Silva et al. (2005) obtiveram Rn em áreas do Semiárido brasileiro, enquanto Di Pace et al. (2008) analisaram o impacto da topografia no cômputo do Rn. Já Gomes et al. (2009) avaliaram alterações que a substituição da vegetação natural por cultivos agrícolas e floresta de crescimento rápido provoca nos balanços de radiação e energia.

O saldo de radiação, combinado com o fluxo de calor no solo, são parâmetros-chave que caracterizam a evapotranspiração. Na estimativa do Rn, a temperatura da superfície é comumente obtida por dados de sensoriamento remoto. Para os algoritmos atuais, os parâmetros de determinação do Rn, incluindo albedo da superfície, emissividade da superfície, temperatura do ar, emissividade do ar e radiação de onda curta incidente, necessitam usualmente de modelos de transferência radiativa, observações pretéritas de campo ou suposições sobre certos parâmetros (BISHT et al., 2005).

Informações adicionais sobre a obtenção da radiância, reflectância, índices de vegetação, emissividade, temperatura da superfície e albedo podem ser encontradas em Allen et al. (2002), Silva et al. (2005), Santos e Silva (2008) e Gomes et al. (2009). Utilizando dados de estações agrometeorológicas georreferenciadas diversos parâmetros podem ser espacializados aplicando técnicas de interpolação espacial. Por exemplo, Islam et al. (2003) geraram mapas de Rn por interpolação de dados de estações, através da técnica do inverso do quadrado da distância ponderada. Um dos problemas desta técnica é que a mesma produz um gradiente não representativo da heterogeneidade da superfície (BISHT et al., 2005). Por conseguinte, o sensoriamento remoto provê a determinação de uma variável

pixel a pixel em escala regional e global para diversas aplicações de monitoramento ambiental, tendo em vista que as redes de observações de campo representam uma pequena área da superfície (BATRA, 2005). Dessa forma, torna-se importante explorar dados de sensoriamento remoto de modo a superar problemas espaciais comumente vistos nos métodos convencionais de estimativas de saldo de radiação e fluxo de calor no solo.

Nesse sentido, este estudo tem por objetivo espacializar o saldo de radiação instantâneo e médio diário, e fluxo de calor no solo em diferentes tipos de uso e ocupação do solo por meio de imagens MODIS e do algoritmo SEBAL, juntamente com um modelo senoidal.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo compreende um quadrante que envolve as margens direita e esquerda do reservatório de Itaparica, abrangendo parte dos estados de Pernambuco (margem esquerda) e Bahia (margem direita).

A combinação das bandas 1, 2 e 3 do MODIS é vista na Figura 1, que esboça o quadrante caracterizando a localização geográfica nos estados de Pernambuco e Bahia. Geograficamente a área visitada em campo está inserida entre as coordenadas UTM SAD-69 de 479500 e 613200 metros de longitude E, e 9048500 e 8968500 metros de latitude N, pertencente à zona 24S com meridiano central de  $-39^\circ$ . Os pontos amostrais observados em campo para caracterização do uso e cobertura do solo estão sobrepostos à imagem.

### 2.2 Processamento de dados orbitais

Foi utilizada uma imagem MODIS do Satélite Terra do ano de 2008, compreendendo os produtos: MOD09GA, MOD09GQ e MOD07A1. As imagens foram transformadas em TIFF projeção senoidal e posteriormente projetadas para coordenadas geográficas WGS84. Após esses procedimentos a imagem foi recortada conforme o retângulo envolvente da bacia (Figura 1) e importadas para o SPRING 5.1.8, onde cada equação foi modelada em LEGAL. As camadas importadas foram: a) reflectâncias nas bandas 1 e 2 com resolução de 231,36

metros, que representaram os dados de entrada na determinação do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - NDVI, Índice de Vegetação com Ajuste do Solo - SAVI e Índice de Área Foliar - LAI; b) refletâncias nas bandas de 1 a 7 com resolução de 463,31 metros para determinação do albedo da superfície; c) temperatura da superfície e emissividades das bandas 31 e 32, com resolução de 926,63 metros, além do ângulo zenital solar, com resolução também de 926,63 metros. Essas resoluções foram reamostradas para 250, 500 e 1000 metros.

### 2.3 Modelagem do saldo de radiação

Para a espacialização do fluxo de calor no solo -  $G_0$  e do saldo de radiação -  $R_n$  foram utilizadas imagens do satélite Terra/ MODIS de 06 de janeiro de 2008, e os parâmetros foram modelados conforme descritos a seguir.

#### 2.3.1 NDVI, SAVI e LAI

Com as reflectâncias das bandas 1 -  $r_{RED}$  (0,63 - 0,69 mm) e 2 -  $r_{NIR}$  (0,76 - 0,90 mm) determinou-se o NDVI, SAVI e LAI pelas equações 1, 2 e 3, respectivamente, em LEGAL, utilizando dados do MOD09GQ (HUETE E WARRICK, 1990; ALLEN et al., 2002).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

$$SAVI = \frac{(1 - L) \times (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{(L + \rho_{NIR} + \rho_{RED})} \quad (2)$$

$$LAI = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (3)$$

#### 2.3.2 Albedo

Com as reflectâncias -  $r_b$  das bandas 1 a 7 foi calculado o albedo da superfície, conforme modelo proposto por Tasumi et al. (2008):

$$r_s = 0,215r_{b1} + 0,215r_{b2} + 0,242r_{b3} + 0,129r_{b4} + 0,101r_{b5} + 0,062r_{b6} + 0,037r_{b7} \quad (4)$$

#### 2.3.3 Temperatura da superfície

Para o MOD11A1 a temperatura da superfície pode ser determinada a partir de uma simples equação linear:

$$T_0 = ND \times 0,02 \quad (5)$$

em que: ND é o número digital da banda. A emissividade da superfície foi

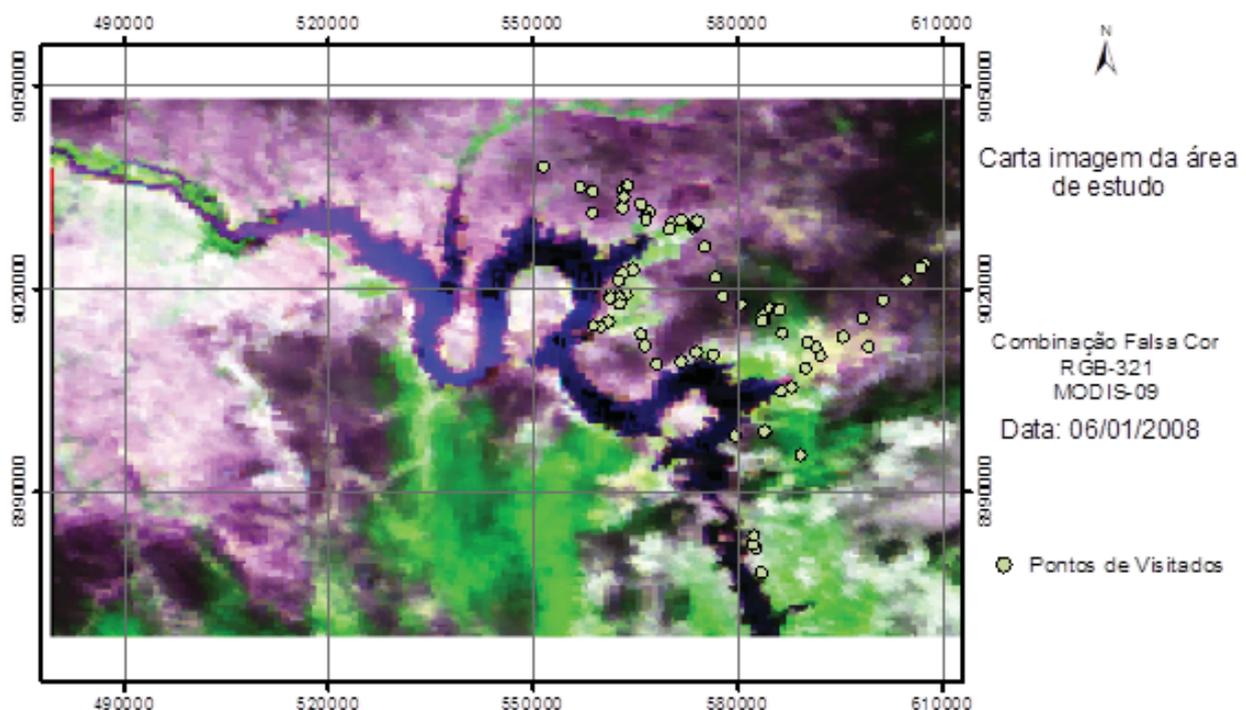


Fig.1- Combinação falsa cor RGB-321 da imagem MODIS produto MOD09GA para o entorno do reservatório de Itaparica.

determinada utilizando a Equação 6 para as banda 31 e 32. A Equação 6a refere-se à emissividade da banda 31, enquanto que a Equação 6b está relacionada à emissividade na banda 32. A emissividade na banda larga foi determinada pela média entre as duas emissividades conforme Equação 6c.

$$\epsilon_{31} = 0,002ND_{31} + 0,49 \quad (6a)$$

$$\epsilon_{32} = 0,002ND_{32} + 0,49 \quad (6b)$$

$$\epsilon_0 = \frac{\epsilon_{31} + \epsilon_{32}}{2} \quad (6c)$$

### 2.3.4 Fluxo de calor no solo

Para determinação do fluxo de calor no solo, faz-se necessário calcular primeiro o saldo de radiação. Na sua determinação, são necessários os seguintes parâmetros e variáveis: albedo, radiação de onda longa incidente, radiação de onda curta incidente, emissividade da superfície no infravermelho termal e temperatura da superfície. Para o cálculo da segunda variável, foram necessários os dados de temperatura do ar e umidade relativa que foram adquiridas no Laboratório de Meteorologia de Pernambuco (LAMEPE). Estes dois dados foram necessários para o cálculo da pressão de vapor saturado, pressão de vapor atual, emissividade

da atmosfera e por fim a radiação de onda longa incidente, conforme Equação (7), que é considerada espacialmente constante, com o valor de  $354,0 \text{ Wm}^{-2}$  para a data considerada (BASSTIAANSSEN e BEKER, 2000), mas neste trabalho foi determinado um grid em que a emissividade atmosférica foi determinada em função da transmitância atmosférica conforme Equação 8 (ALLEN et al., 2002):

$L^{\downarrow} = \epsilon_{atm} \times \sigma \times T_{air}^4$	(7)
--	-----

$\epsilon_a = 0,85 \times (\ln \tau_{sw})^{0,09}$	(8)
---	-----

em que:  $\epsilon_{atm}$  é a emissividade atmosférica,  $\sigma$  é a constante de Boltzmann,  $\tau_{sw}$  é a transmitância atmosférica e  $T_{air}$  é a temperatura do ar (K).

A transmitância atmosférica foi espacializada de acordo com a equação 9:

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \exp \left[ \frac{-0,00146P}{k_t \cos \theta_{hor}} - 0,075 \left( \frac{W}{\cos \theta_{hor}} \right)^{0,47} \right] \quad (9)$$

em que  $\theta_{hor}$  é o ângulo zenital solar; P é a pressão atmosférica média em kPa, calculada conforme Equação 10;  $k_t$  é o coeficiente de turbidez da atmosfera, que neste caso foi considerado  $k_t = 1$ , para céu claro (ALLEN, 1996); W é a água precipitável (mm) calculada

de acordo com a Equação 11 (GARRISON E ADLER, 1990):

$$P = 101,3 \times \left( \frac{T_a - 0,0065z}{T_a} \right)^{5,26} \quad (10)$$

$$W = 0,14e_a \times P_{air} + 2,1 \quad (11)$$

em que  $T_a$  é a temperatura do ar em Kelvin e  $z$  é a altitude, que espacialmente pode ser expressa pelo grid da área.

Nesse estudo a temperatura do ar foi considerada igual à do Município de Floresta-PE, com 27,7°C e a altitude a do SRTM, que foi mosaificada e recordada no formato da área de estudo.

Para a espacialização da pressão de vapor atual, foi utilizada a equação:

$$e_a = \frac{UR \times e_s}{100} \quad (12)$$

em que UR é a umidade relativa (%) e  $e_s$  (hPa) a pressão de saturação de vapor. Para a região a UR foi de 49%. A  $e_s$  foi determinada conforme a equação:

$$e_s = 0,6108 \times \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_a}{237,3 + T_a}\right) \quad (13)$$

em que  $T_a$  é dada em °C.

Para o cálculo da terceira variável, foi calculada a radiação solar instantânea que é função do ângulo zenital solar, constante solar e distância Sol-Terra. Em seguida, foi determinada a densidade do fluxo de radiação perpendicular ao topo da atmosfera, e finalmente a radiação de onda curta recebida na superfície que é expressa pela equação 14:

$$\begin{aligned} K_{(x,y)}^{\downarrow} &= K_{TOA}^{\downarrow} \times \tau_{sw} \rightarrow \\ K_{(x,y)}^{\downarrow} &= S \times \cos\theta \times d_r \times \tau_{sw} \end{aligned} \quad (14)$$

em que  $K_{TOA}^{\downarrow}$  é a radiação de onda curta incidente no topo da atmosfera,  $\theta$  é o ângulo zenital solar,  $d_r$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol e  $\tau_{sw}$  é a transmitância atmosférica, conforme calculada anteriormente.

Os dados de ângulo zenital solar foram determinados para cada pixel através de uma

operação no SPRING e programação no MATLAB, em que foi gerado um arquivo dat e importado para o SPRING no formato spr.

A radiação de onda longa emitida (Equação 16) foi determinada considerando a emissividade e a temperatura da superfície:

$$L_{(x,y)}^{\uparrow} = \varepsilon_0 \times \sigma \times T_o^4 \quad (15)$$

em que  $\varepsilon_0$  é a emissividade de cada pixel,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma=5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ) e  $T_o$  é a temperatura da superfície (K).

A partir da estimativa dos cinco parâmetros acima, foi realizado o cálculo do saldo de radiação, como expresso na Equação (16). Todos os parâmetros foram programados em LEGAL.

$$R_n = (1 - r_o)K^{\downarrow} + L^{\downarrow} - \varepsilon_o \sigma T_o^4 - (1 - \varepsilon_o)L^{\uparrow} \quad (16)$$

em que  $r_o$  é o albedo;  $K^{\downarrow}$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) é a radiação de onda curta incidente;  $L^{\downarrow}$  é a radiação de onda longa incidente ( $\text{Wm}^{-2}$ );  $\varepsilon_o$  é a emissividade da superfície;  $\sigma$  é a constante de Boltzmann e  $T_o$  (K) é a temperatura da superfície. Para a programação do modelo do fluxo de calor no solo, foram necessários os valores de albedo, NDVI, temperatura e radiação global:

$$G_o = \left[ \frac{T_o}{r_o} \times (0,0038r_o + 0,0074r_o^2) (1 - 0,98\text{NDVI}^4) \right] \times R_n \quad (17)$$

O saldo de radiação máximo foi determinado através de equação proposta por Bisht et al. (2005):

$$R_{n\_max} = \frac{IRN}{\sin \times \left[ \left( \frac{t_{overpass} - t_{rise}}{t_{set} - t_{rise}} \right) \times \pi \right]} \quad (18)$$

em que IRN ( $\text{Wm}^{-2}$ ) é o saldo de radiação instantâneo (equação 16),  $t_{overpass}$  é a hora de passagem do satélite,  $t_{rise}$  é a hora do dia em que o saldo se torna positivo e  $t_{set}$  é a hora do dia em que o saldo volta a se tornar negativo.

O cálculo do saldo de radiação médio diário (DANR) foi espacializado conforme a Equação 19, modelada por Bisht et al. (2005):

$$DANR = \frac{\int_{t_{rise}}^{t_{set}} R_n(t) dt}{\int_{t_{rise}}^{t_{set}} dt} = \frac{2R_{n\_max}}{\pi} = \frac{2INR}{\pi \sin \times \left[ \left( \frac{t_{overpass} - t_{rise}}{t_{set} - t_{rise}} \right) \times \pi \right]} \quad (19)$$

### 3. RESULTADOS

A Figura 2 apresenta a carta-imagem do fluxo de calor no solo. Observa-se que para corpos d'água e vegetação de alto verdor e densa os valores de  $G_o$  são baixos, tendo valores médios de  $80 \text{ Wm}^{-2}$ . Para vegetação secundária e área degradada o  $G_o$  apresentou valores médios de  $126,6$  e  $132,6 \text{ Wm}^{-2}$ , respectivamente. Para caatinga arbórea o  $G_o$  foi igual a  $124,9 \text{ Wm}^{-2}$ . Para áreas irrigadas com cultivo de banana e coco foram encontrados valores de  $G_o$  iguais a  $103,8$  e  $98,6 \text{ Wm}^{-2}$ , respectivamente.

A Figura 3 mostra as estatísticas descritivas para cada tipo de uso e cobertura do solo referente ao fluxo de calor no solo.

Observa-se que áreas de caatinga secundária com solos diferentes apresentam diferença mínima no fluxo de calor no solo (Figura 3). É possível observar que áreas com plantio de coco apresentaram os menores valores de  $G_o$  (med =  $98,6 \text{ Wm}^{-2}$ ) enquanto as áreas degradadas apresentam os valores mais elevados

de  $G_o$  (med =  $132,6 \text{ Wm}^{-2}$ ).

A Figura 4 representa a variação no espaço do saldo de radiação instantâneo para a área de estudo. Percebe-se que áreas de solo exposto e degradadas possuem  $R_n$  baixo, que correspondem às áreas escuras no mapa, enquanto que áreas correspondentes a corpos d'água, como por exemplo, o reservatório de Itaparica, são representadas por tons mais claros correspondentes aos valores mais elevados. As áreas no mapa com tons intermediários correspondem à caatinga arbórea e florestada cujos valores médios de  $R_n$  foram de  $626,1$  e  $728,0 \text{ W m}^{-2}$ , respectivamente.

Dve acordo com a Figura 4, percebe-se que há uma variação no comportamento da variável  $R_n$ , o que pode indicar que o tempo em que essa variável torna-se positivo ( $t_{pos}$ ) e negativo ( $t_{neg}$ ) muda de acordo com o uso e cobertura do solo, principalmente no estudo de bacias hidrográficas onde há uma grande heterogeneidade da superfície. Nesse sentido propõe-se neste trabalho essa nova consideração no modelo senoidal proposto por Bisht et al. (2005). Nesse caso deve-se considerar o mapa de  $t_{pos}(x,y)$  e  $t_{neg}(x,y)$  variando no espaço de acordo com a variabilidade das classes de uso e cobertura do solo em uma dada região. Por conseguinte é mostrado a seguir na Figura 5 uma adaptação do

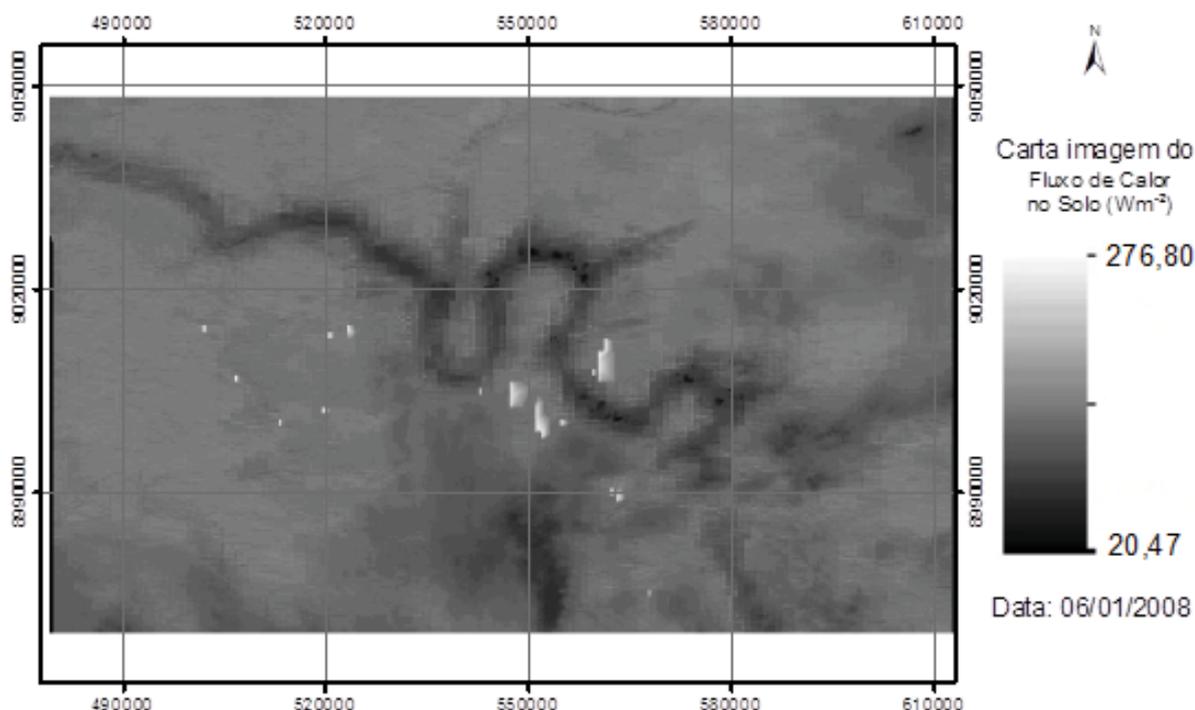


Fig. 2 - Carta imagem do fluxo de calor no solo para o entorno do reservatório de Itaparica.

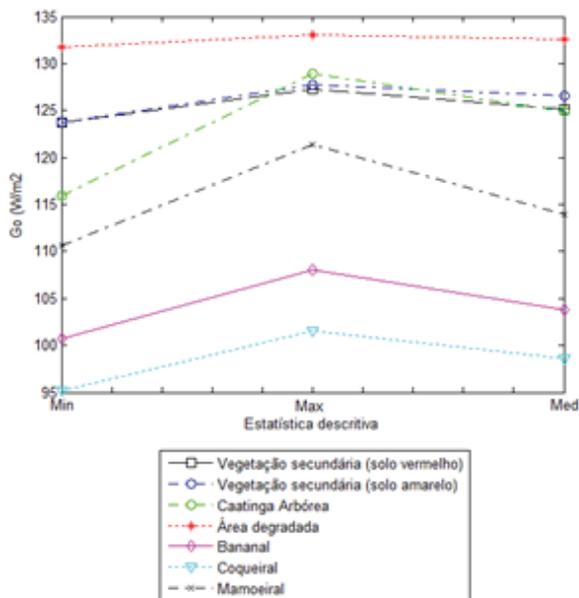


Fig. 3 - Gráfico das estatísticas descritivas para a variável Fluxo de Calor no Solo – Go.

modelo proposto por Bisht et al. (2005), em que a curva contínua em negrito representa o saldo de radiação para um determinado uso.

Os valores representados por  $x$  e  $y$  denotam as posições de cada pixel. Para essa aplicação faz-se necessário a geração do mapa de cobertura e uso do solo, e a partir desse mapa por programação se construiria o mapa de  $t_{pos}$  e  $t_{neg}$  para cada classe, considerando hipoteticamente que o comportamento térmico de cada classe é variável. Pesquisa objetivando a determinação desses tempos para cada tipo de classe de uso e cobertura do solo é necessária, bem como, o tipo de solo já que possui condutividade térmica, calor específico e densidade diferentes no espaço e no tempo (GILMAN, 1980).

É apresentado na Figura 6 o gráfico da estatística descritiva da variação do  $R_n$  instantâneo em função do uso e cobertura do solo.

Na Figura 6 observa-se que a caatinga arbórea se situa entre áreas irrigadas e áreas degradadas e de caatinga secundária em relação aos valores de saldo de radiação instantâneo. Para caatinga arbórea, área degradada e área irrigada (coco) os valores médios de  $R_{n_{inst}}$  foram de 626,1, 549,7 e 647,4  $Wm^{-2}$ , respectivamente. Os extremos de valores de  $R_{n_{inst}}$  foram observados para área irrigada (banana) com  $R_{n_{min}}$  de 648,6  $Wm^{-2}$  e  $R_{n_{max}}$  de 681,4  $Wm^{-2}$ , e para área degradada com  $R_{n_{min}}$  de 545,8  $Wm^{-2}$  e  $R_{n_{max}}$  de

552,1  $Wm^{-2}$ . Quanto à vegetação secundária em que se consideram os tipos de solos, pode-se verificar que há uma ligeira diferença, em que a área com solo vermelho apresenta maiores valores de  $R_n$  em relação à área com solo amarelo levando-se em consideração os valores de mínimo e máximo e, conseqüentemente, para a média. Uma explicação pode ser o valor do NDVI e albedo que pode variar em função da cor do solo já que a intensidade da curva de reflectância espectral do solo está relacionada à sua cor (HILL E MÉGIER, 1994) e, por conseguinte, aos constituintes orgânicos e inorgânicos (BEN-DOR E BANIN, 1995).

A Figura 7 traz o mapa do saldo de radiação médio diário ( $Wm^{-2}$ ) calculado a partir do modelo senoidal proposto por Bisht et al. (2005), espacializado no SPRING em linguagem LEGAL.

O valor mínimo do saldo de radiação médio diário foi de 329,0  $Wm^{-2}$  e o máximo foi de 601,6  $Wm^{-2}$ . Esse valor elevado é devido ao modelo senoidal superestimar os valores calculados em relação aos observados como visto em Bisht et al. (2005), podendo obter erro de 20% em alguns pontos avaliados e  $R^2$  de 0,98 e 0,85 para o  $R_n$  instantâneo e  $R_n$  médio diário, respectivamente.

O saldo de radiação médio diário é apresentado na forma de gráfico considerando o uso e cobertura do solo (Figura 8).

O comportamento do  $R_n$  médio diário se mostra semelhante ao  $R_n$  máximo para todas as classes em avaliação, conforme visto na Figura 8. Nos estudos realizados por Bisht et al. (2005), o  $R_n$  médio diário variou de 205 a 450  $Wm^{-2}$ , e foi verificado que o modelo tende a superestimar os valores.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foram aplicadas equações para determinação do fluxo de calor no solo e do saldo de radiação. O saldo de radiação foi determinado para o instante de passagem do satélite Terra/EOS, isto é, o  $R_n$  instantâneo, como também foi estimado o  $R_n$  máximo e o  $R_n$  médio diário aplicando o modelo senoidal.

Observa-se que há necessidade de um melhor conhecimento do modelo e das classes de uso e cobertura do solo no sentido de validar com dados de campo ajustando-se cada variável

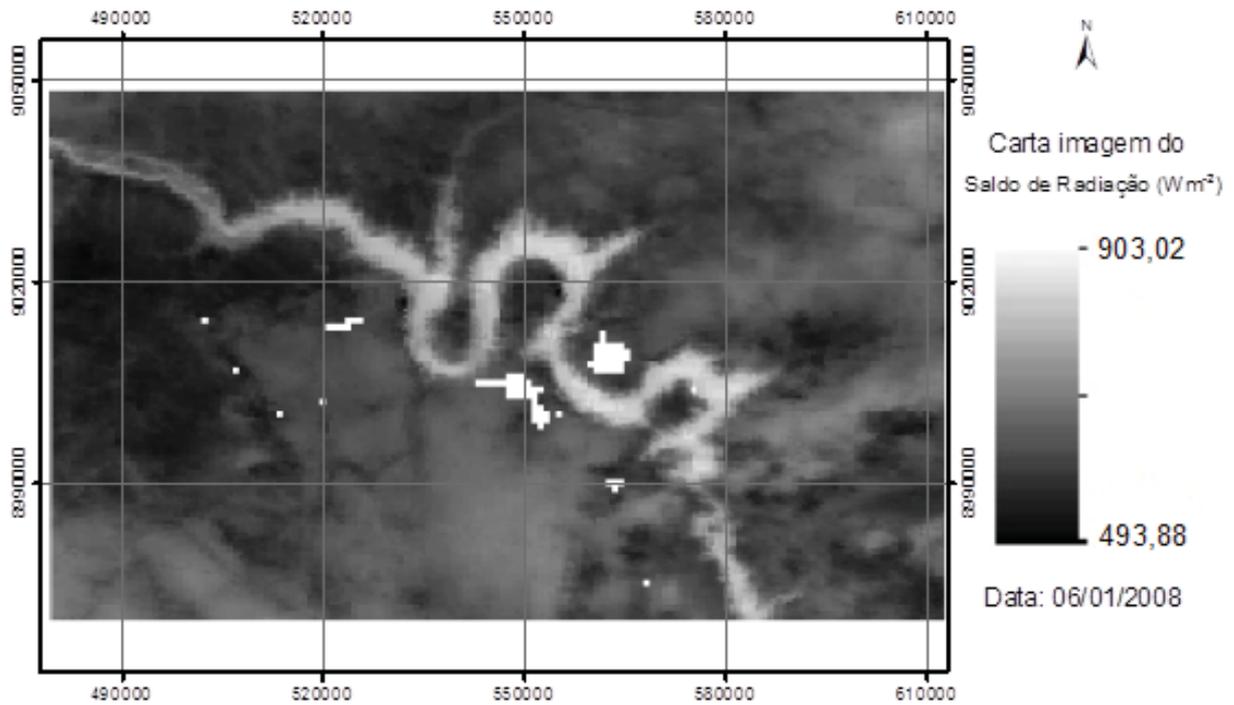


Fig. 4 - Mapa do saldo de radiação.

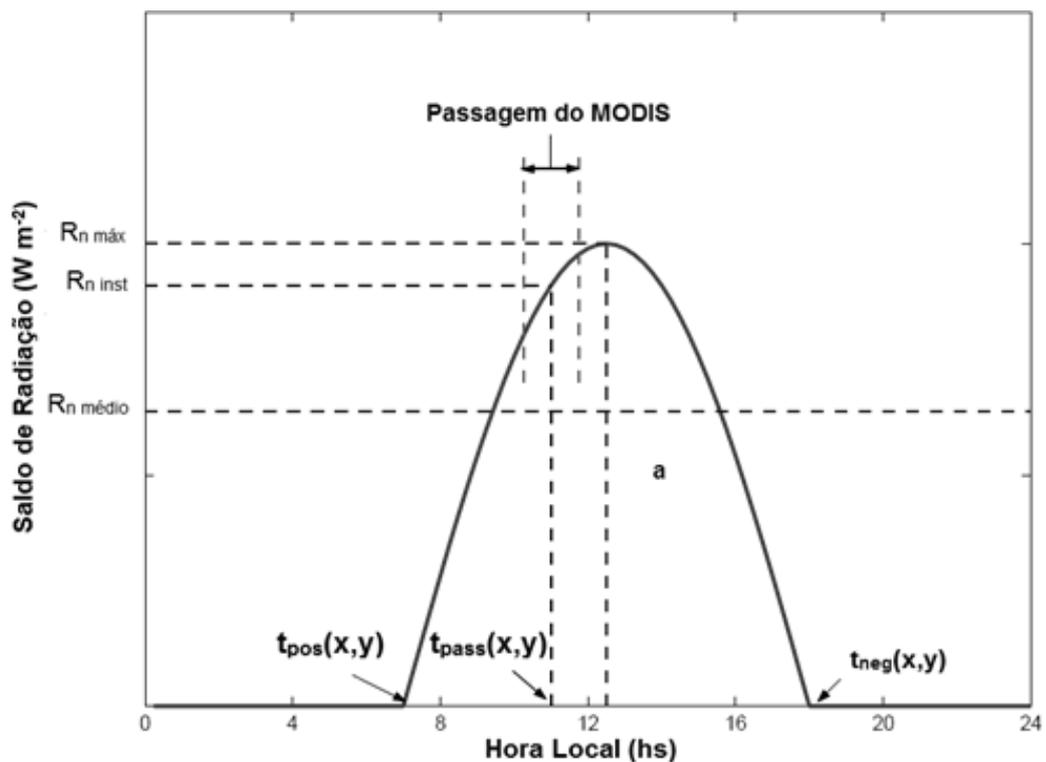


Fig. 5 - Modelo senoidal do saldo de radiação. Adaptado de Bisht et al., (2005)

do modelo em função das classes de uso.

Nesse sentido, torna-se necessário buscar respostas quanto às variáveis  $t_{pos}$  e  $t_{neg}$  considerando os diversos usos e coberturas do solo para cada pixel.

Estudos são necessários utilizando essas hipóteses de forma a produzir uma melhor

otimização do modelo.

Constatou-se que é possível aplicar o modelo senoidal para determinar o saldo de radiação máximo e médio diário considerando diversos usos e cobertura do solo. Porém, há necessidade de comparação com dados de campo para a validação deste modelo relacionado ao

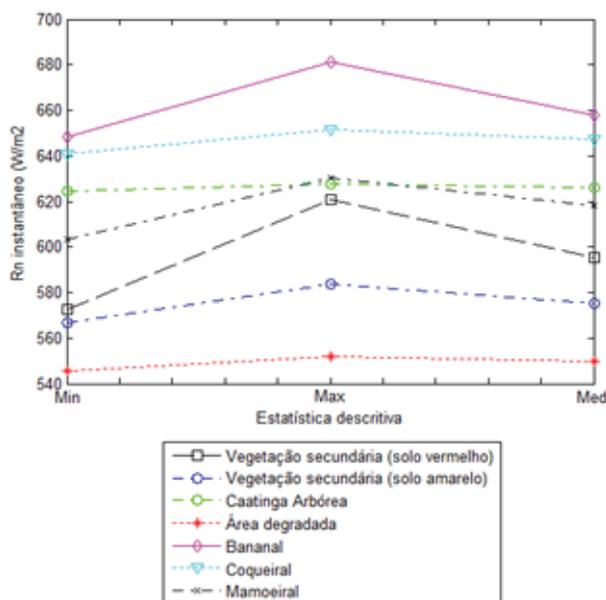


Fig. 6 - Gráfico da estatística descritiva do saldo de radiação instantâneo para classes de uso e cobertura do solo.

ecossistema caatinga e cultivos irrigados, de forma a avaliar o comportamento diário de cada variável. Não foram aplicadas técnicas de desagregação, e a resolução espacial do pixel deve ser considerada em escala local de forma a obter melhores resultados.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, L. J. G. Balanço de radiação em áreas de floresta e de pastagem em Rondônia. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa. 70p. 2007.

ALLEN, R. G. Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.122, n.2, p.97-106, 1996.

ALLEN, R.G; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). *Advanced Training and User's Manual – Idaho Implementation 1*, 98p., 2002.

AZEVEDO, P. V. DE; B. B DA SILVA; SILVA, V. P. R DA . Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, v. 58, n. 3, p. 241-254, 2003.

AZEVEDO, P. V. DE; SOUZA, C. B. DE; SILVA, B. B. DA; SILVA, V. P. R. DA. Water requirements of pineapple crop grown in a tropical environment. *Agricultural Water Management*, v. 88, n.1-3, p. 201-208, 2007.

BASTIAANSSEN, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain – a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. Ph. D. Thesis. Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands. 273p, 1995.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) I. Formulation. *Journal of Hydrology*, v. 212–213, p.198–212, 1998.

BATRA, N. Estimation and comparison of evapotranspiration from multiple satellites for clear sky days. Thesis (Master of Science) - University of Cincinnati, 151p. 2005.

BEN-DOR, E.; BANIN, A. Near infrared analysis (NIRA) as a simultaneously method to evaluate spectral featureless constituents in soils. *Soil Science*, v. 159, p. 259–269, 1995.

BISHT, G.; BRAS, R. L. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern Great Plains case study. *Remote Sensing of Environment*, v.114, p.1522–1534, 2010.

BISHT G.; VENTURINI V.; ISLAM S.; JIANG L. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment*, v.97, p.52 – 67, 2005.

COMPAORÉ, H.; HENDRICKX, J. M.; HONG, S.; FRIESEN, J.; VAN DE GIESEN, N. C.; RODGERS, C.; SZARZYNSKI, J.; VLEK, P. L. G. Evaporation mapping at two scales using optical imagery in the White Volta Basin, Upper East Ghana. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 33, p. 127-140, 2008.

COURALT, D.; SEGUIM, B., OLIOSO, A. Review to estimate Evapotranspiration from remote sensing data: save examples from the simplified relationship to the use mesoscale atmospheric models. *ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions*, 17 Sept., 2003.

DI PACE, F. T.; SILVA, B. B. DA; SILVA, V. DE P. R. DA; SILVA, S. T. A. da. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. *Revista Brasileira*

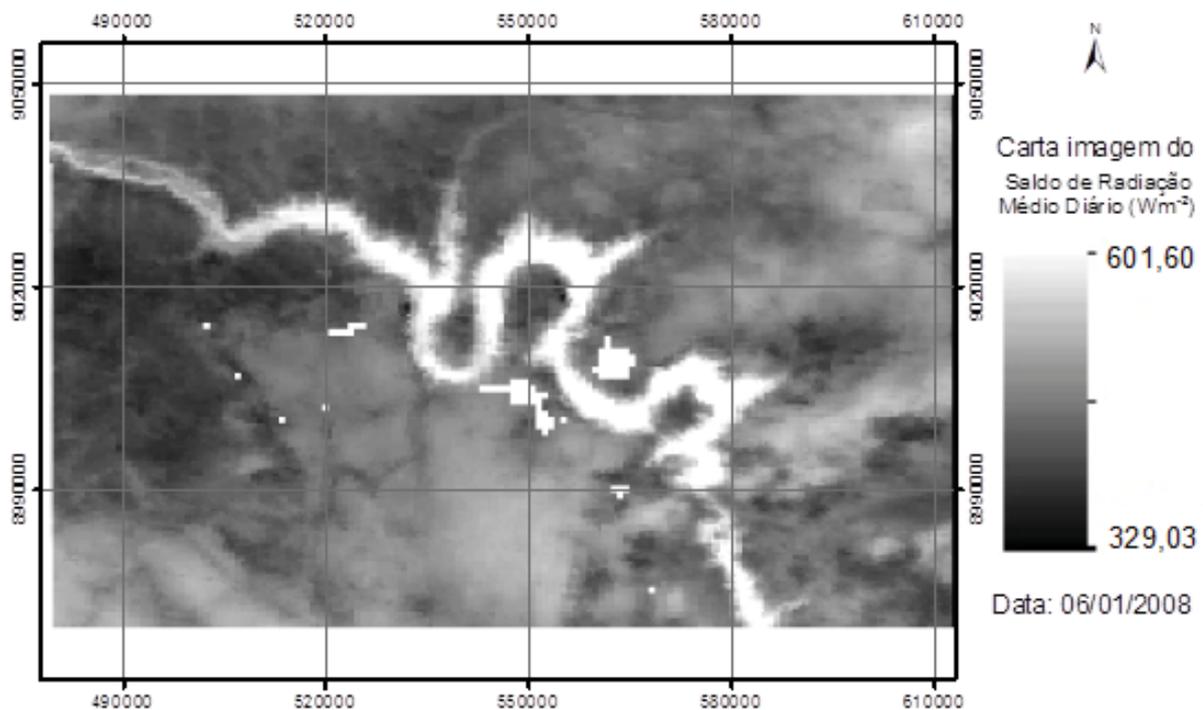


Fig. 7 - Valores médios diário do saldo de radiação para área de estudo.

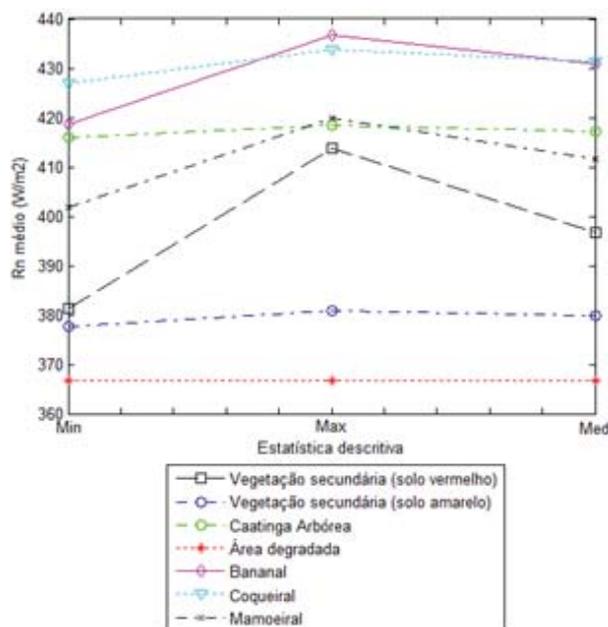


Fig. 8 - Gráfico da estatística descritiva para o saldo de radiação médio diário considerando classes de uso e cobertura do solo.

de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 12, n. 4, p. 385-392, 2008.

FERREIRA, N. J. Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e Tiros-N. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 271p., 2004.

GARRISON, J. D.; ADLER, G. P. Estimation of precipitable water over the United States for

application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. Solar Energy, v.44, n.4, p.225-241, 1990.

GILMAN, K. Estimating the soil heat flux in an upland drainage basin. Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques, v. 25, n. 4, p. 435-451, 1980.

GOMES, H. B., SILVA, B. B. da, CAVALCANTI, E. P., ROCHA, H. R. da. Balanço de radiação em diferentes biomas no Estado de São Paulo mediante imagens Landsat 5. Geociências, v.28, p.153-164, 2009.

HILL, J.; MÉGIER, J. Imaging Spectrometry - a Tool for Environmental Observations. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1994. 87p.

HUETE, A. R.; WARRICK, A. W. Assessment of Vegetation and Soil Water Regimes in Partial Canopies with Optical Remotely Sensed Data. Remote Sensing of Environment, v. 32, p.155-167, 1990.

ISLAM, S.; ELTAHIR, E.; JIANG, L. Final report on satellite based evapotranspiration estimation for South Florida Water Management District. 74p. 2003.

JACOBS, J. M.; MYERS, D. A.; ANDERSON,

- M. C.; DIAK, G. R. GOES surface insolation to estimate wetlands evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, v.266, p.53– 65, 2000.
- MA, Y.; SU, Z.; LI, Z.; KOIKE, T.; MENENTI, M. Determination of regional net radiation and soil heat flux over a heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau. *Hydrological Processes*, v.16, p.2963–2971, 2002.
- SANTOS, C. A.; SILVA, B. B. da. Estimativa da evapotranspiração da bananeira em região semi-árida através do algoritmo S-SEBI. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 16, p. 9-20, 2008.
- SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V.; SILVA B. B. da. Surface energy fluxes and evapotranspiration of a mango orchard grown in a semiarid environment. *Agronomy Journal*, v. 99, n. 6, p. 1391-1396, 2007.
- SILVA, B. B. da ; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5 -TM. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 13, n. 2, p. 11-21, 2005.
- SILVA, B. B. da; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C. Balanço de radiação no perímetro irrigado São Gonçalo – PB mediante imagens orbitais. *Revista Caatinga*, v.24, p.145-152, 2011.
- TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 13, n. 2, p. 51-63, 2008.
- TEIXEIRA, A. H. de C. Determining Regional Actual Evapotranspiration of Irrigated Crops and Natural Vegetation in the São Francisco River Basin (Brazil) Using Remote Sensing and Penman-Monteith Equation. *Remote Sensing*, v.2, n.5, p.1287-1319, 2010.
- ZHANG, B.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, L. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.148, n. 10, p. 1629-1640, 2008.