

## SALDO DE RADIAÇÃO POR MEIO DE IMAGENS ORBITAIS NA REGIÃO DA CHAPADA DO ARARIPE<sup>1</sup>

Dantas, M. J. F.<sup>2</sup>; Arraes, F. D. D.<sup>3</sup>; Souza D. C. B.<sup>4</sup>; Sá, V. V.<sup>5</sup>; Rocha, F. M. N.<sup>5</sup>;  
Nogueira, Y. D.<sup>5</sup>

**RESUMO:** O saldo de radiação disponível à superfície é fortemente modulado pela radiação solar que chega ao solo, e é repartido em energia para aquecimento do ar, aquecimento do solo e para processos evaporativos. Os componentes do balanço de radiação podem ser medidos por vários métodos e equipamentos, mas quando o objetivo é realizar o monitoramento espacial temporal de uma bacia hidrográfica faz-se necessário o uso de técnicas de sensoriamento remoto. O presente estudo teve como objetivo estimar o saldo de radiação ( $R_n$ ) da área da bacia do riacho Jardim/CE localizada no semiárido cearense, para isso utilizou-se 08 imagens do satélite Landsat 5 TM em dias de céu claro, na órbita 217/65 correspondente aos anos de 1992, 1994, 1999, 2001, 2005, 2008, 2009 e 2011. Utilizou-se o software Erdas Imagine 11 por meio de seu módulo model maker. A radiação líquida foi obtida usando a metodologia do algoritmo Sebal. Na área da bacia foi possível verificar grande variação nos resultados de  $R_n$ , foram encontrados valores de  $R_n$  iguais ou superiores a  $650 \text{ W. m}^{-2}$ , localizadas na região de reserva da Chapada do Araripe, alguns pixels atingiram valores entre 680 a  $804 \text{ W.m}^{-2}$ , nessas áreas há boa cobertura vegetativa, que envolvem vegetação de floresta nativa densa, e as áreas de vegetação bastante densa. Foram encontrados valores de  $600 \text{ W. m}^{-2}$  em áreas de vegetação nativa com densidade intermediária. Observou-se que o cenário não sofreu alteração significativa entre as datas estudadas, exceto na cena do ano 1992, apresentando quase em sua totalidade áreas com  $R_n$  entre 500 e  $550 \text{ W. m}^{-2}$ .

**PALAVRAS-CHAVE:** sebal, bacia hidrográfica, planejamento ambiental.

## BALANCE OF RADIATION THROUGH ORBITAL IMAGES IN THE REGION OF CHAPADA DO ARARIPE

<sup>1</sup> Extraído da Tese do primeiro autor.

<sup>2</sup> Doutora em Agronomia (Energia na Agricultura – UNESP/FCA), Professora da Universidade de Fortaleza- UNIFOR, Fundação Edson, CEP:60811905 Fortaleza, CE Brasil Telefone: (85)9 97309176. Email: jorgiana@unifor.br

<sup>3</sup> Prof. Doutor IFSERTÃO - campus Salgueiro/PE.

<sup>4</sup> Prof. Mestra UNIFOR.

<sup>5</sup> Graduando em Engenharia Civil UNIFOR.

**ABSTRACT:** The balance of radiation available to the surface is strongly modulated by the solar radiation that reaches the ground, and is divided into energy for heating the air, heating the soil and for evaporative processes. The components of the radiation balance can be measured by various methods and equipment, but when the objective is to perform the temporal spatial monitoring of a watershed, it is necessary to use remote sensing techniques. The present study had the objective of estimating the radiation balance (Rn) of the area of the Jardim / CE watershed located in the semi-arid region of Ceará, for which 8 images of the Landsat 5 TM satellite were used on clear sky days in orbit 217 / 65 corresponding to the years 1992, 1994, 1999, 2001, 2005, 2008, 2009 and 2011. Erdas Imagine 11 software was used through its model maker module. The net radiation was obtained using the methodology of the Sebal algorithm. In the basin area, it was possible to observe a great variation in the results of Rn, Rn values equal to or greater than  $650 \text{ W. m}^{-2}$ , located in the reserve region of the Araripe, were found, some pixels reached values between  $680$  and  $804 \text{ Wm}^{-2}$ , in these areas there is good vegetative cover, which involve dense native forest vegetation, and areas of fairly dense vegetation.  $600 \text{ W. m}^{-2}$  values were found in areas of native vegetation with intermediate density. It was observed that the scenario did not change significantly between the studied dates, except in the scene of the year 1992, presenting almost in its totality areas with Rn between  $500$  and  $550 \text{ W. m}^{-2}$ .

**KEYWORDS:** sebal, watershed, environmental planning.

## INTRODUÇÃO

A radiação solar que chega a Terra é a fonte de energia necessária para praticamente toda a vida e os movimentos atmosféricos de nosso planeta. O saldo de radiação (Rn) representa a energia disponível aos processos físicos e biológicos que ocorrem na superfície terrestre sendo definido como o balanço de radiação de todos os fluxos radiativos que chegam e saem de uma superfície (KLEIN et al., 1977; WELIGEPOLAGE, 2005), que é de fundamental importância para o entendimento e a quantificação dos impactos causados nas trocas de energia entre a superfície e a atmosfera.

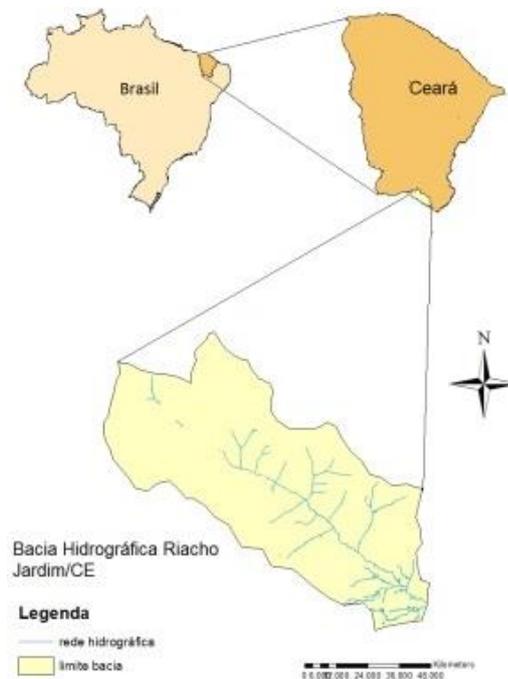
Nos últimos anos diferentes algoritmos que possibilitam a estimativa da evapotranspiração em escala regional baseada em imagens orbitais têm sido desenvolvidos, dentre os quais se destaca o Surface Energy Balance Algorithm for Land - SEBAL. O mesmo

utiliza imagens de satélites que possibilitam a obtenção dos fluxos de energia à superfície, a determinação da ET e a estimativa de parâmetros biofísicos.

O presente trabalho objetiva estimar o saldo de radiação usando as parametrizações do SEBAL na sub-bacia hidrográfica do Riacho Jardim, no semiárido cearense, durante oito anos de estudo: 1992, 1994, 1999, 2001, 2005, 2008, 2009 e 2011.

### Metodologia

A área estudada fica localizada na divisa com o estado de Pernambuco, no sul do Estado do Ceará e corresponde à bacia hidrográfica do Riacho Jardim cujas coordenadas em UTM 9131500 m e 9197800 m N; 421000 m e 510000 m E, zona 24 S, DATUM WGS 84, com uma área de 1398,73 km<sup>2</sup> (Figura 1).



**Figura 1.** Mapa de localização da Sub-bacia hidrográfica do Riacho Jardim/CE.

Para se estimar os diferentes componentes necessários para o cálculo do saldo de radiação da superfície com imagens de satélites foi utilizado o algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), proposto por Bastiaanssen *et al.* (1998), sendo depois modificado por Allen *et al.* (2002). As etapas computacionais envolvidas para a obtenção dos componentes do Balanço de Energia foram: Cálculo de radiância, reflectância, albedo, emissividade, temperatura da superfície, além do cálculo de alguns índices como NDVI e IAF para obtenção do saldo de radiação final.

**Calibração Radiométrica:** O cálculo da radiância espectral de cada banda  $L_{\lambda_i}$ , em que o número digital (ND) é convertido em radiância espectral monocromática, representando a

energia solar refletida, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medida ao nível do satélite TM Landsat 5. Para isso foi utilizada a equação proposta por Chander e Markhan (2003):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} \times ND$$

Em que:  $L_{\lambda i}$  é a radiância espectral de cada banda ( $W m^{-2} st^{-1} \mu m^{-1}$ );  $a_i$  o coeficiente de calibração (radiância mínima) de cada banda ( $W m^{-2} st^{-1} \mu m^{-1}$ );  $b_i$  o coeficiente de calibração (radiância máxima) de cada banda ( $W m^{-2} st^{-1} \mu m^{-1}$ );  $i$  são as bandas (1, 2, ..., 7) do Landsat 5 e ND é o número digital de cada pixel na imagem.

Reflectância: O cálculo da reflectância monocromática de cada banda  $\rho_{\lambda i}$ , foi obtida segundo a equação (ALLEN *et al.*, 2002):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} \cdot \cos Z \cdot d_r}$$

Em que:  $L_{\lambda i}$  é a radiância espectral de cada banda;  $k_{\lambda i}$  é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ( $W m^{-2} \mu m^{-1}$ );  $Z$  é o ângulo zenital solar (obtido por meio do cabeçalho das imagens adquiridas, e depende da órbita/ponto e da época do ano) e  $d_r$  é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância Terra-Sol em dado dia do ano. O parâmetro  $d_r$  é determinado, segundo Tasumi (2003), pela equação:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left( DJ \frac{2\pi}{365} \right)$$

Onde: DJ–Dia Juliano do ano das imagens de satélite cujos valores correspondentes ao dia da geração das imagens, bem como o  $d_r$  e o  $\cos Z$ .

Albedo planetário: O cálculo do albedo planetário  $\alpha_{toa}$ , foi obtido pela combinação linear das reflectâncias monocromáticas dos canais reflectivos do TM – Landsat 5 (SILVA *et al.*, 2005):

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

Em que:  $\rho_1$ ;  $\rho_2$ ;  $\rho_3$ ;  $\rho_4$ ;  $\rho_5$  e  $\rho_7$  são as reflectâncias monocromáticas das bandas 1; 2; 3; 4; 5 e 7, respectivamente.

Albedo de Superfície: O albedo de superfície tem grande importância na determinação do balanço de radiação e carece de correções. O cálculo do albedo de superfície ou albedo corrigido para os efeitos atmosféricos ( $\alpha$ ) foi obtido pela equação (SILVA *et al.*, 2005).

$$\alpha = \frac{\alpha_{\text{toa}} - \alpha_p}{\tau_{\text{sw}}^2}$$

Na qual:  $\alpha_{\text{toa}}$  albedo no topo da atmosfera;  $\alpha_p$  é a radiação solar refletida pela atmosfera que varia de 0,025 a 0,04, mas para o SEBAL é recomendado usar 0,03 segundo Bastiaanssen (2000);  $\tau_{\text{sw}}$  é a transmissividade atmosférica.

Índice de Vegetação (NDVI): O valor do NDVI foi obtido por meio da razão entre a diferença da reflectância do infravermelho próximo ( $\rho_4$ ) e a do vermelho ( $\rho_3$ ), normalizada pela soma de ambas (ALLEN *et al.*, 2002), ou seja:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3}$$

Em que:  $\rho_4$ ,  $\rho_3$  correspondem, respectivamente, as reflectâncias das bandas 4 e 3 do sensor TM Landsat 5.

Emissividades: Calculou-se a emissividade da superfície e a energia irradiada por um corpo negro à mesma temperatura. No SEBAL, de acordo com Allen *et al.* (2002), as emissividades  $\varepsilon_{\text{NB}}$  e  $\varepsilon_0$  foram obtidas, para  $\text{NDVI} > 0$  e  $\text{IAF} < 3$ , segundo:

$$\varepsilon_{\text{NB}} = 0,97 + 0,00331 \times \text{IAF}$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 \times \text{IAF}$$

Temperatura da Superfície: A temperatura na superfície terrestre ( $T_s$ ) (ARAÚJO, 2006) é obtida com base na radiância espectral da banda termal ( $L_{\lambda 6}$ ) e emissividade ( $\varepsilon_{\text{NB}}$ ), obtida na etapa anterior, por meio da expressão abaixo em Kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ):

$$T_s = \frac{K_2}{\text{Ln} \left( \frac{\varepsilon_{\text{NB}} K_1}{L_{\lambda 6}} + 1 \right)}$$

Em que:  $K_1 = 607,76 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$  e  $K_2 = 1260,56 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$  são as constantes de calibração da banda termal do sensor TM Landsat 5 (ALLEN *et al.*, 2002).

Radiação de Onda Longa Emitida: A radiação de onda longa emitida pela superfície  $R_{L\uparrow}$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) é obtida através da equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

Onde:  $\varepsilon_0$  é a emissividade de cada pixel;  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ );  $T_s$  é a temperatura da superfície (graus Kelvin  $^{\circ}\text{K}$ ).

Radiação de Onda Curta Incidente: A radiação de onda curta incidente ( $W m^{-2}$ ) foi calculada para cada pixel, de acordo com Allen *et al.* (2002):

$$R_{S\downarrow} = S \cdot \cos Z \cdot d_r \cdot \tau_{sw}$$

Onde: S é a constante solar ( $1367 W m^{-2}$ ), Z é ângulo zenital solar, é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol e é a transmissividade atmosférica, obtida com modelo digital de elevação do SRTM.

Radiação de Onda Longa Incidente: O valor da radiação de onda longa incidente ( $W m^{-2}$ ) pode ser obtido através da equação de Stefan-Boltzman, conforme a expressão:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_F^4$$

Onde:  $\varepsilon_a$  é a emissividade atmosférica obtida, por  $= 0,85(-\ln(\tau_{sw}))^{0,09}$ ;  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} K^{-4}$ ) e  $T_F$  (K) é a temperatura da superfície no pixel frio, conforme Allen *et al.* (2002) e Tasumi (2003). A temperatura do ar próximo a superfície é considerada igual à temperatura da superfície no pixel frio, uma vez que, nesse pixel, o calor sensível é também considerado nulo.

Saldo de Radiação: Após o cálculo dos componentes do saldo de radiação ( $R_n$ ) definido como a energia radiativa disponível à superfície foi obtido utilizando a equação de balanço de radiação à superfície (ALLEN *et al.*, 2002; SILVA *et al.*, 2005).

$$R_n = (1 - \alpha)R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o)R_{L\downarrow} \quad (16)$$

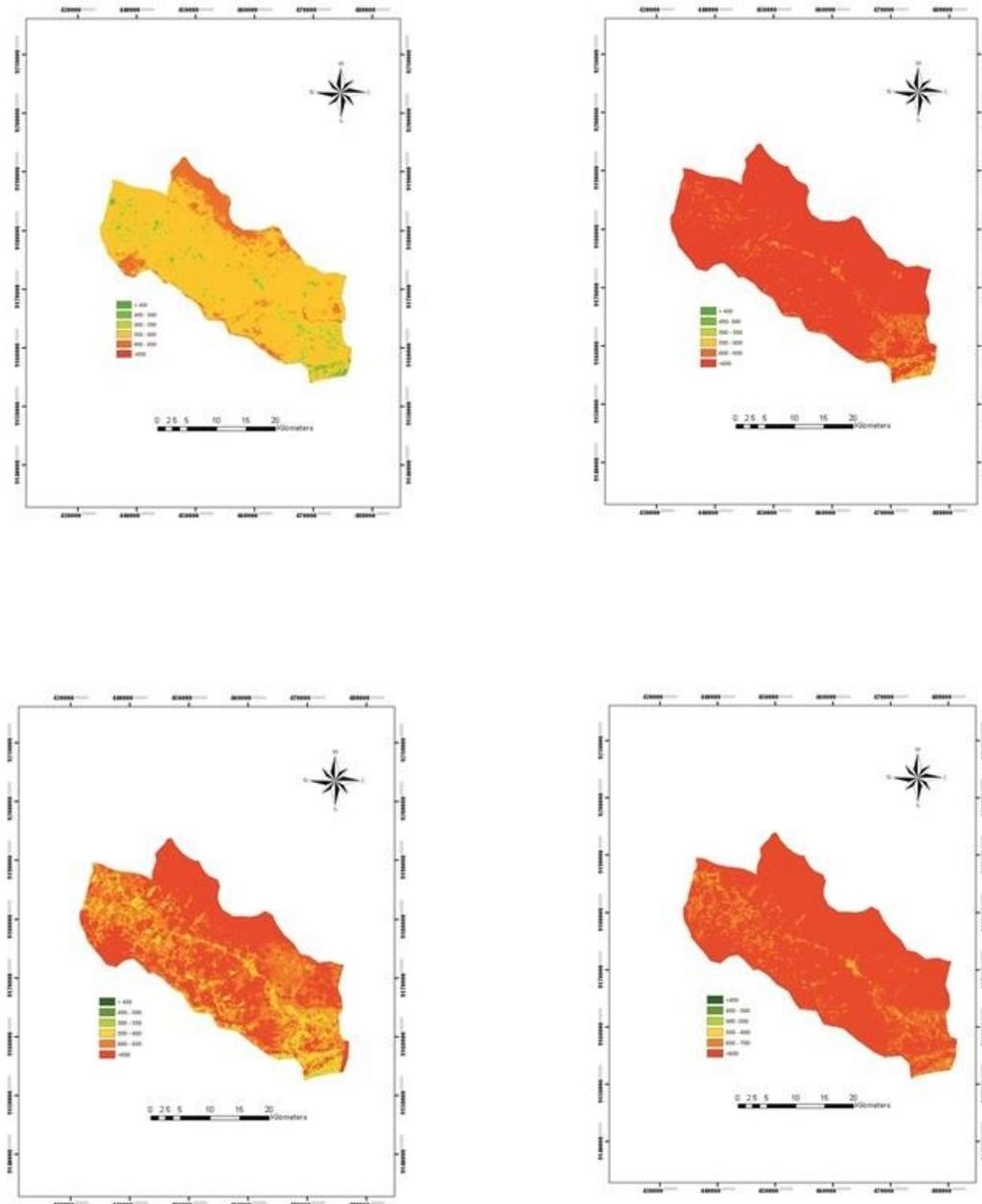
Onde:  $R_{S\downarrow}$  é a radiação de onda curta incidente, é o albedo corrigido de cada pixel, é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel, é a radiação de onda longa emitida por cada pixel e é a emissividade de cada pixel.

## RESULTADOS E DISCURSÕES

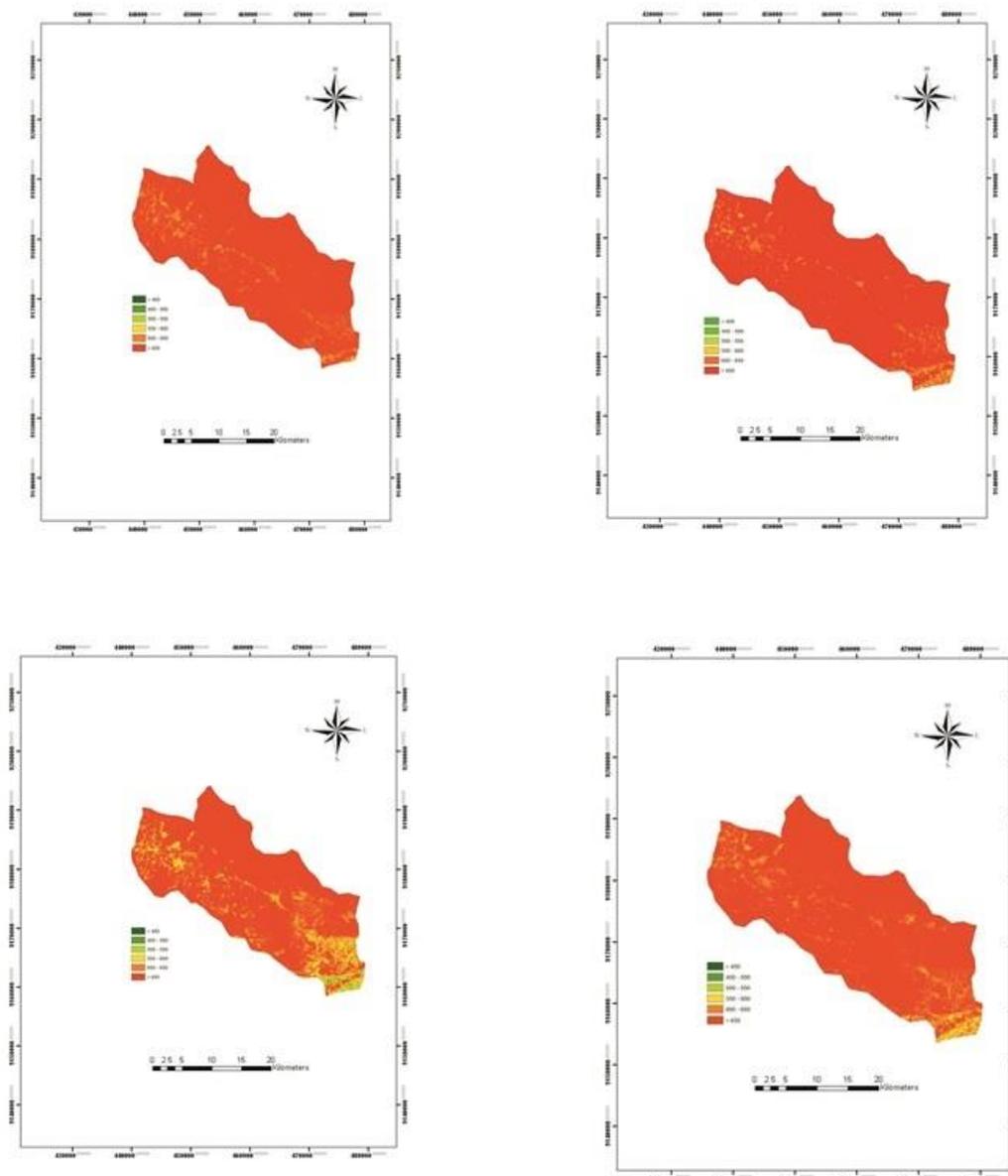
Os valores de  $R_n$  da área da bacia do riacho Jardim foram calculados para condição de céu claro no momento da passagem do satélite Landsat 5 às 9:45 h (hora solar) e estão apresentados nas Figuras 2 e 3. Nota-se grande variação de  $R_n$  e também que a incidência da radiação solar é o principal condicionante ao  $R_n$ .

Primeiramente, detectou-se as áreas com tonalidade vermelha representando as áreas da superfície com  $R_n$  iguais ou superiores a  $650 W m^{-2}$ , localizadas na região de reserva da

Chapada do Araripe, alguns pixels atingiram valores entre 680 a 804  $\text{W.m}^{-2}$ , nessas áreas há boa cobertura vegetativa. Resultados parecidos foram obtidos por Bezerra (2006) que, usando imagens de 2005, obteve um  $R_n$  de 700 a 790,2  $\text{W.m}^{-2}$  no mesmo local. As áreas com tonalidade alaranjada com valores de 600  $\text{W m}^{-2}$  foram encontradas em áreas de vegetação nativa com densidade intermediária. Bezerra (2006) obteve uma média de  $R_n$  de 614,9  $\text{W.m}^{-2}$  na mesma região.



**Figura 2.** Mapas de Saldo de Radiação na Sub-bacia do Riacho Jardim/CE, nos anos de 1992,1994, 1999 e 2001.



**Figura 3.** Mapas de Saldo de Radiação na Sub-bacia do Riacho Jardim/CE, nos anos de 2005, 2008, 2009 e 2011.

Destaca-se que o cenário não sofreu grandes alterações entre as datas estudadas, exceto em 1992, apresentando áreas com Rn entre 500 e 550 W m<sup>-2</sup>, devendo-se ao fato de nesse ano as áreas com menores Rn foram enquadradas como as áreas que apresentam o solo exposto e cobertura vegetação de baixa densidade, uma vez que as espécies da caatinga poderiam encontrar-se sem folhas, podendo ser confundidas com o solo nu, combinando assim, com valores encontrados por Bezerra (2006) para áreas com características similares irrigadas do Projeto Nilo Coelho e adjacências no município de Petrolina- PE, onde áreas com solo exposto e vegetação nativa bastante rala apresentaram Rn próximos a 550 W m<sup>-2</sup>. Moreira (2007) na

faixa de  $500 \text{ W.m}^{-2}$  e Silva *et al.* (2005) com  $618,7 \text{ W.m}^{-2}$ , também obtiveram valores e resultados parecidos em áreas com esse tipo de vegetação.

## CONCLUSÃO

Observou-se que a substituição da vegetação provocou modificações no saldo de radiação reduzindo a quantidade de energia disponível para os processos físicos e biológicos na superfície. As áreas caracterizadas como áreas de solo exposto ou com vegetação nativa bastante rala, apresentam valores baixos de  $R_n$ .

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; WATERS, R.; BASTIAANSEN, W. **Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) – Advanced training and Users Manual**, Idaho, 2002. 98 p.
- ARAÚJO, T. L. **Estimativa da temperatura e do saldo de radiação à superfície terrestre em Maceió-Al utilizando imagens TM/Landsat 5. 2006.** 112p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2006.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M.A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212/213, p.198–212. 1998.
- BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hidrology**. V. 229, p. 87-100. 2000.
- BEZERRA; B. G. **Balanço da energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri cearense através do algoritmo SEBAL.** 2006.147p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2006.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41. n. 11. 2003.
- KLEIN, S. A. **Calculation of Monthly Average Insolation on tilted surfaces.** Solar energy, v.9, p.325-329, 1977.

**MOREIRA, L. C. J. Estimativa da evapotranspiração horária usando o algoritmo SEBAL e imagens Landsat 5-TM.** 2007. 91f. Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, 2007.

SILVA, B. B. da; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de, Determinação do Albedo em áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5-TM, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 13, n. 2, p. 201-211, 2005.

TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery.** PhD thesis, Dept. Biological and Agricultural Engineering, University of Idaho. Idaho, 2003.

WELIGEPOLAGE, K. **Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration by satellite remote sensing – A case study in Hupselse Beek, The Netherlands**, p.114, 2005.