

Dados ASTER/Terra aplicados à estimativa do balanço de radiação na Amazônia

Gabriel de Oliveira ¹
Elisabete Caria Moraes ¹
Yosio Edemir Shimabukuro ¹
Bernardo Friedrich Theodor Rudorff ¹
Regina Célia dos Santos Alvalá ²
Tiago Veloso dos Santos ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
CEP 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{gdo, bete, yosio, bernardo}@dsr.inpe.br
thiago.veloso@inpe.br

² Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CEP 12630-000 - Cachoeira Paulista - SP, Brasil
regina.alvala@cemaden.gov.br

Abstract. Currently there is a great concern about deforestation of tropical areas, particularly in the Amazon, and its influence on climate. Field experiments have been conducted involving continuous collection of data about the energy exchange between the land surface and the atmosphere in the Amazon region. However, the measurements obtained by these experiments are generally representative of small areas. In this context, the present study aimed to determine the net radiation in an area located in the central-eastern part of Rondônia state (RO) using ASTER data through the SEBAL model. To implement this model, air temperature data, measured in a micrometeorological tower in the scope of LBA Project located in Jaru Biological Reserve (RO), and ASTER images relating to reflectance and surface temperature products (AST07XT and AST08) were used. Then it was possible to verify how much and how the replacement of tropical forest by pasture can modify the surface energy fluxes, showing the potential of the methodology in assessing the impact, in different climatic variables, caused by land use and land cover changes. The use of ASTER data and SEBAL model in the Amazon, where the cloud cover and the large-area are problematic, allowed the estimation and spatialization of radiation balance in a systematic way in a region where most of the information is generated locally.

Palavras-chave: fluxos de energia na superfície, floresta amazônica, resolução espacial, sensoriamento remoto, surface energy fluxes, Amazon rainforest, spatial resolution, remote sensing.

1. Introdução

Atualmente é grande a preocupação com o desmatamento das áreas tropicais e sua influência no clima. Em determinados locais do planeta, e particularmente na Amazônia, há uma crescente conversão da floresta tropical em campos de pastagens e de cultivos agrícolas (Davidson et al., 2012). As características físicas da vegetação e dos solos têm grande influência nas trocas de energia, água e momentum entre a superfície terrestre e a atmosfera. Assim, mudanças na vegetação implicam em mudanças das propriedades físicas da superfície, incluindo o albedo superficial, a rugosidade da superfície, o índice de área foliar, a profundidade das raízes, e a umidade do solo (Prentice et. al, 1992).

A radiação solar é o fator mais importante para os processos ecológicos, tais como evapotranspiração e fotossíntese, que controlam a distribuição, tipo e fisionomia da vegetação terrestre (Aguiar, 2007). Dada a importância dos fenômenos físicos que envolvem a radiação armazenada pelo planeta, torna-se necessário o seu conhecimento detalhado em escala temporal e espacial, o que possibilita o aprimoramento de estudos referentes ao ciclo do carbono, previsão do tempo e clima, além de possibilitar o estudo de mudanças climáticas (Houborg et al., 2007). Há alguns anos vêm sendo realizados experimentos micrometeorológicos envolvendo coletas contínuas de dados na Amazônia (Von Randow et

al., 2004), no entanto, as medidas obtidas por tais experimentos são pontuais e geralmente representativas de pequenas áreas.

Considerando ainda o custo de instalação de equipamentos de medição e a carência de recursos humanos e econômicos, novas metodologias foram desenvolvidas para a obtenção dos componentes relacionados às trocas de energia entre a superfície e a atmosfera, como o uso do sensoriamento remoto (Santos et al., 2011). Nesse contexto, alguns modelos têm sido formulados usando informações obtidas por satélites, como reflectância e temperatura da superfície, dentre os quais se destaca o *Surface Energy Balance Algorithms for Land* (SEBAL) (Bastiaanssen, 1995). O sensor *Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), a bordo da plataforma Terra, possui resolução espacial superior à dos sensores mais comumente utilizados para estudos nesta temática, como o TM/Landsat 5 e o MODIS (Terra e Aqua).

Portanto, o presente estudo teve como objetivo determinar o balanço de radiação em uma área situada no centro-leste do estado de Rondônia (RO), utilizando dados do sensor ASTER por intermédio do modelo SEBAL.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de estudo

A área definida para estudo está localizada na metade centro-leste do estado de Rondônia, entre as latitudes $09^{\circ} 55' 54''$ S e $10^{\circ} 16' 39''$ S e longitudes $62^{\circ} 03' 02''$ W e $61^{\circ} 50' 51''$ W, conforme mostrada na Figura 1. Especificamente, abrange parte dos municípios de Ariquemes, Ji-Paraná, Ouro Preto do Oeste, Theobroma e Vale do Paraíso, além de parte da Reserva Biológica do Jaru. A área de estudo possui $\approx 85.087,00$ hectares onde são encontrados diferentes tipos de uso e cobertura da terra, dentre eles: floresta tropical ombrófila aberta, vegetação secundária, pastagem, solo exposto, afloramentos de rocha e corpos de água.

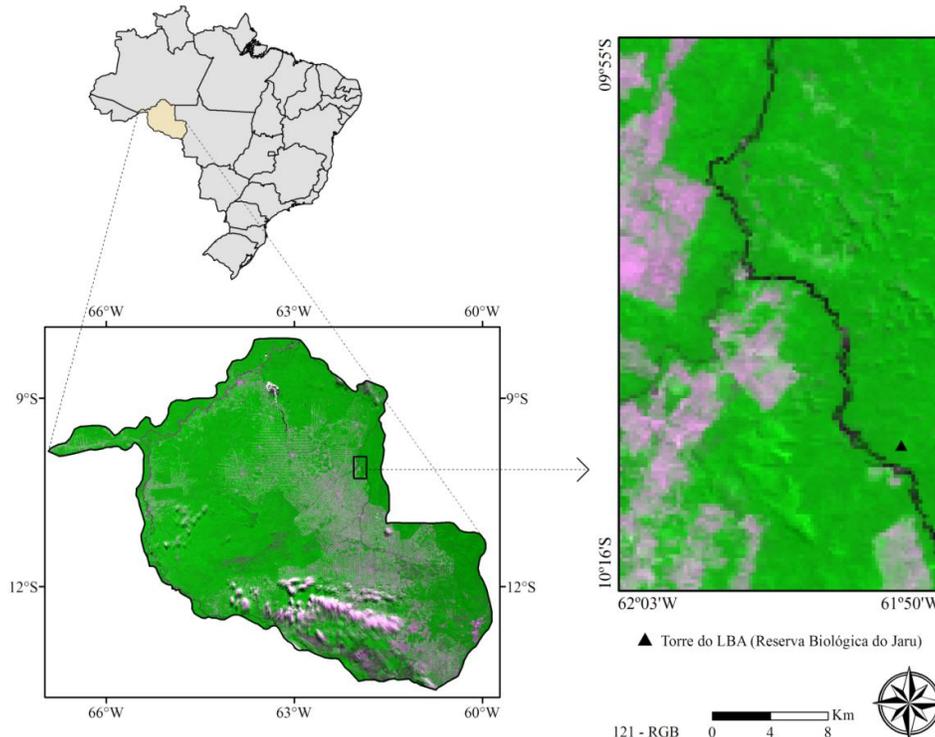


Figura 1. Localização da área de estudo. A composição colorida foi obtida com dados do sensor MODIS/Terra (MOD09GQ) de 25/07/2003.

2.2 Dados *in situ* e orbitais

As medidas de superfície foram obtidas de arquivos históricos referentes à torre micrometeorológica situada no sítio experimental da Reserva Biológica do Jarú (ilustrada na Figura 1) no âmbito do Projeto de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA). Esses arquivos foram disponibilizados pelo Escritório Regional do Projeto LBA de Ji-Paraná (RO). As variáveis utilizadas, correspondentes à temperatura do ar e precipitação, foram necessárias tanto para inserção no modelo SEBAL nos dias de implementação (16/06/2004 e 05/07/2005) quanto para análise dos resultados.

Os dados ASTER/Terra foram obtidos junto ao *Land Processes Distributed Active Archive Center (LPDAAC)/United States Geological Survey (USGS)*. Utilizaram-se quatro imagens da órbita/ponto 231/067 dos dias 16/06/2004 e 05/07/2005, alusivas aos produtos AST07XT e AST08. O produto AST07XT corresponde à reflectância da superfície para as bandas 1 a 3 e 5 a 10, com resolução espacial de 15 m para as bandas do VNIR (1 a 3) e de 30 m para as bandas do SWIR (5 a 10); e o AST08 diz respeito à temperatura da superfície (K), estimada a partir das bandas 11 a 15, com resolução espacial de 90 m. O processamento dos dados orbitais consistiu inicialmente na reamostragem dos *pixels* nos produtos AST07XT (bandas 5 a 10) e AST08 pelo método do vizinho mais próximo, de forma que os dados passassem a ter 15 m de resolução espacial. Em uma segunda etapa as imagens ASTER foram corrigidas geometricamente a partir de uma imagem Geocover/Landsat 2000 (quadrícula: S-20-10_2000), disponibilizada pela *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* (<http://zulu.ssc.nasa.gov/mrsid/>). O algoritmo de interpolação utilizado foi o polinomial linear de primeira ordem e o método foi o do vizinho mais próximo. De posse das imagens processadas, foram efetuadas operações de mascaramento de nuvens, que consistiram na identificação visual dessas áreas e sua delimitação através de digitalização no programa ENVI 4.5. Foram identificadas a presença de nuvens nas imagens dos dias 16/06/2004 e 05/07/2005. Assim, efetuou-se a soma dessas áreas ($Nuvem_{16/06/2004} + Nuvem_{05/07/2005}$) para a obtenção de um arquivo vetorial com as áreas de nuvens destes dois dias, que foi aplicado de maneira análoga sobre as imagens de 16/06/2004 e 05/07/2005.

2.3 Estimativas do balanço de radiação pelo modelo SEBAL

A Figura 2 ilustra os principais procedimentos para a obtenção do balanço de radiação pelo modelo SEBAL, cuja implementação se deu no programa ERDAS 9.1. A equação utilizada para a estimativa do balanço de radiação no momento de passagem do sensor ASTER/Terra ($\approx 10h30$) foi a seguinte:

$$R_n = (1 - \alpha_s) K \downarrow + L \downarrow - L \uparrow - (1 - \epsilon_s) L \downarrow \quad (1)$$

em que R_n é o balanço de radiação na superfície ($W m^{-2}$), α_s é o albedo da superfície, $K \downarrow$ representa a radiação solar incidente na superfície ($W m^{-2}$), $L \downarrow$ é a radiação infravermelha termal (IVT) incidente na superfície ($W m^{-2}$), $L \uparrow$ é a radiação IVT emitida pela superfície ($W m^{-2}$) e ϵ_s é a emissividade da superfície.

As estimativas de albedo foram realizadas de acordo com Liang (2001):

$$\alpha_s = 0,820\alpha_1 + 0,183\alpha_2 - 0,034\alpha_3 - 0,085\alpha_5 - 0,298\alpha_6 + 0,352\alpha_7 + 0,239\alpha_8 - 0,240\alpha_{10} - 0,001 \quad (2)$$

em que α_s é o albedo da superfície e α_i ($i=1$ a 10) é a reflectância de superfície das correspondentes bandas do sensor ASTER.

Para o cálculo da emissividade da superfície, primeiramente foi necessário calcular tais índices de vegetação: o índice de área foliar (LAI) e o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (Allen et al., 2002). Assim sendo, para o cômputo da emissividade da superfície a partir dos índices de vegetação, utilizou-se a seguinte equação:

$$\epsilon_s = 0,95 + 0,01LAI \quad (3)$$

A Equação 3, entretanto, só é válida para os *pixels* que apresentarem NDVI maior que zero. Para os *pixels* com NDVI negativo, foi adotada $\epsilon_s=0,985$ (Allen et al., 2002).

A radiação solar incidente foi calculada através da expressão:

$$K \downarrow = \tau S_0 \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 \cos \theta_z \quad (4)$$

em que S_0 corresponde a constante solar (1367 W m^{-2}), θ_z corresponde ao ângulo solar zenital (radianos), d_m e d são, respectivamente, as distâncias média e instantânea entre a Terra e o Sol e τ corresponde a transmitância da atmosfera no instante da passagem do satélite.

A radiação IVT incidente na superfície foi computada a partir da equação de Stefan-Boltzmann:

$$L \downarrow = \epsilon_a \sigma T_a^4 \quad (5)$$

em que ϵ_a é a emissividade da atmosfera, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) e T_a é a temperatura do ar próxima à superfície (K).

Como visto na Equação 5, um dos termos que se insere na equação de Stefan-Boltzmann é a emissividade da atmosfera, que foi assim calculada:

$$\epsilon_a = 0,85 (-\ln \tau)^{0,09} \quad (6)$$

O cálculo da radiação IVT emitida pela superfície foi obtido utilizando-se a equação de Stefan-Boltzmann:

$$L \uparrow = \epsilon_s \sigma T_s^4 \quad (7)$$

em que T_s é a temperatura da superfície (K).

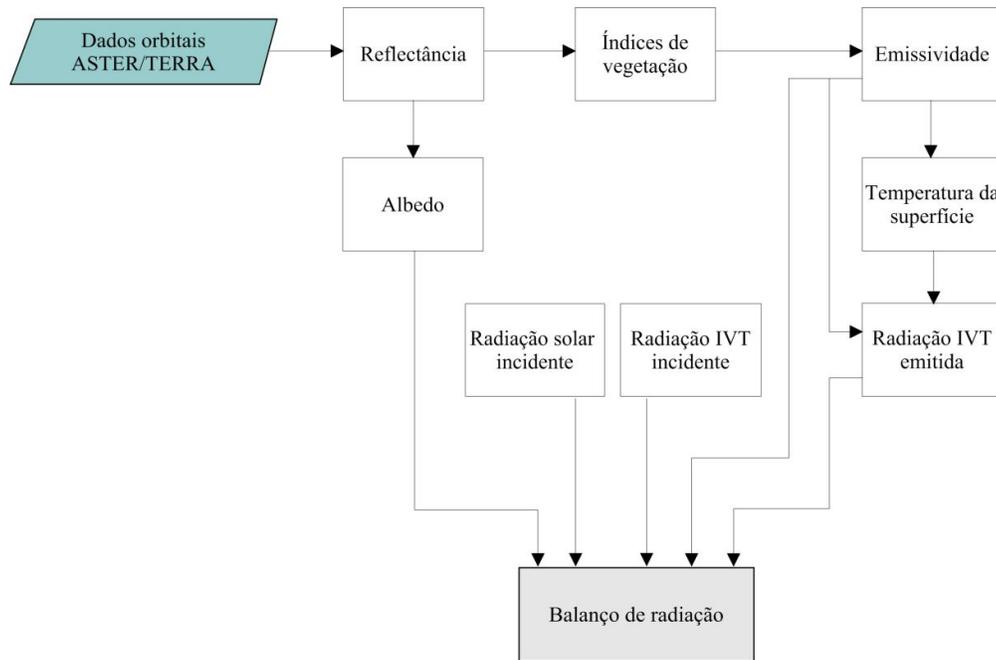


Figura 2. Fluxograma metodológico para determinação do balanço de radiação pelo modelo SEBAL.

3. Resultados e Discussão

A Figura 3 mostra a distribuição espacial do balanço de radiação (R_n) na área de estudo nos dias 16/06/2004 e 05/07/2005. Nas imagens de R_n referentes aos dias 16/06/2004 e 05/07/2005, os valores mínimos e máximos encontrados foram de $237,0$ e $615,7 \text{ W m}^{-2}$, e $377,5$ e $608,8 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente. Os valores médios destas imagens foram de $524,7$ e

518,4 W m⁻² para 2004 e 2005, respectivamente, evidenciando um decréscimo no valor médio de Rn na imagem de 2005 de 1,2%.

A) Balanço de radiação (W m-2)
16/06/2004

B) Balanço de radiação (W m-2)
05/07/2005

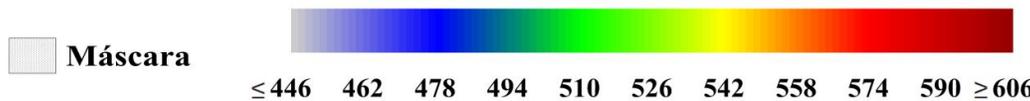
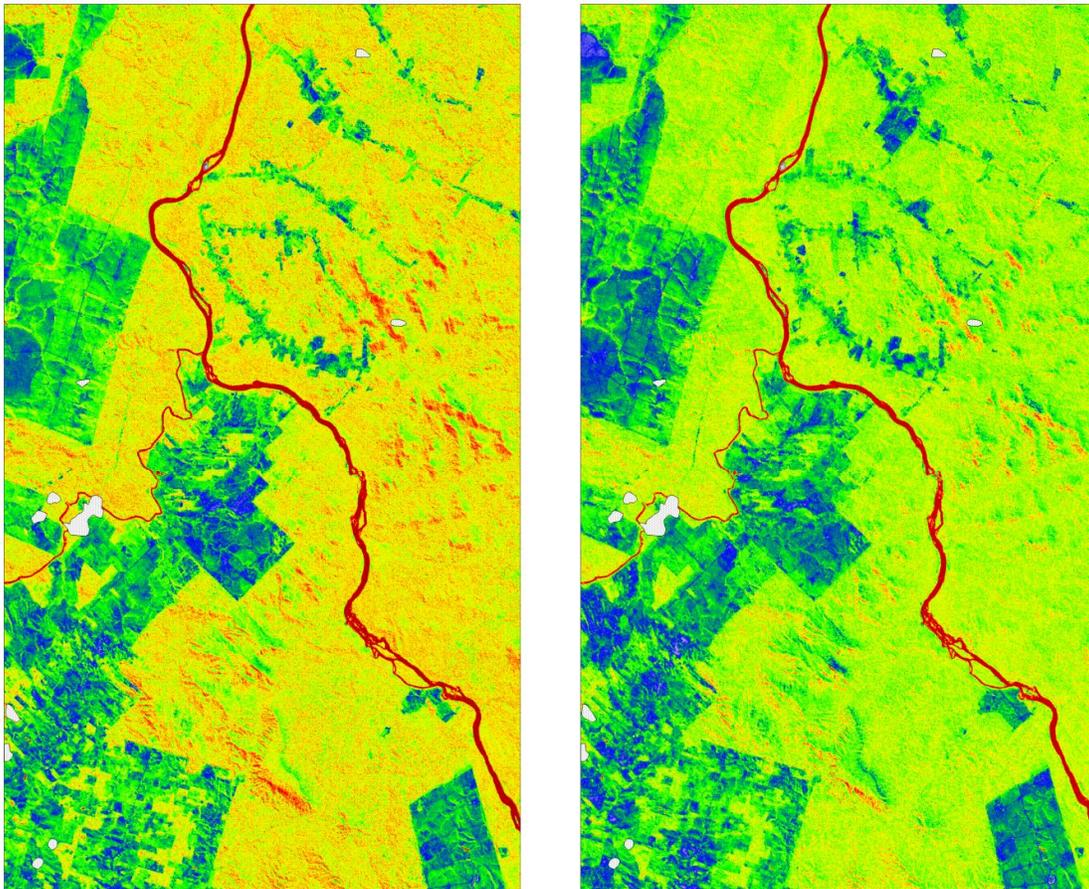


Figura 3. Distribuição espacial do balanço de radiação na área de estudo. A) Dia 16/06/2004 e B) Dia 05/07/2005.

De modo geral, os valores mais elevados são encontrados nos corpos de água e áreas de floresta nativa, enquanto que os mais baixos são encontrados em áreas de solo exposto e pastagem com pequena porcentagem de vegetação. Observa-se também, que os valores de Rn nas duas imagens são próximos, porém há uma tendência dos valores da imagem de 05/07/2005 serem inferiores aos da imagem de 16/06/2004 (como pode ser visto pelos valores médios das imagens e pelas áreas onde não houve mudanças de uso e cobertura da terra). Ao analisar as medidas de precipitação na torre do LBA nos anos de 2004 e 2005 verificou-se a ocorrência de precipitação seis dias antes da aquisição do dado orbital, enquanto que em 2005, o evento de precipitação mais próximo que antecedeu a aquisição do dado orbital ocorreu dezanove dias antes desta data. Assim, a ocorrência de precipitação mais próxima à 16/06/2004 pode ter ocasionado uma redução no albedo da superfície (Von Randow et al., 2004) e, conseqüentemente, um aumento no balanço de radiação. Ainda, é importante

ressaltar a sensibilidade das estimativas do modelo SEBAL, com o uso de imagens ASTER, no que diz respeito a alterações no uso e cobertura da terra. Um exemplo disto é ilustrado nos círculos tracejados nas Figuras 3a e 3b. Nesse caso, houve a conversão da floresta tropical ($\approx 542 \text{ W m}^{-2}$) para pastagem ($\approx 478 \text{ W m}^{-2}$), o que resultou em um decréscimo do balanço de radiação ($\approx 12\%$), percebido na imagem de 05 de julho de 2005. Esse comportamento está coerente com o esperado e está relacionado ao fato das folhas das gramíneas apresentarem uma maior reflectância que o dossel das árvores, o que ocasiona uma diminuição do balanço de radiação solar e, conseqüentemente, do balanço de radiação (Aguar, 2007).

Para uma avaliação mais detalhada das estimativas de R_n para diferentes tipos de uso e cobertura da terra foram selecionadas áreas homogêneas (Figura 4) com tamanho de 24 *pixels* cada, representando: floresta ombrófila aberta ($10^\circ 09' 39'' \text{ S}$ e $61^\circ 52' 28'' \text{ W}$), vegetação secundária ($10^\circ 14' 25'' \text{ S}$ e $62^\circ 01' 22'' \text{ W}$), pastagem ($10^\circ 10' 31'' \text{ S}$ e $62^\circ 01' 39'' \text{ W}$) e corpo de água ($10^\circ 08' 51'' \text{ S}$ e $61^\circ 54' 31'' \text{ W}$). Para cada área, nas duas datas estudadas, foram coletados os valores dos *pixels* e calculadas estatísticas descritivas básicas.

**Imagem ASTER/TERRA
16/06/2004**

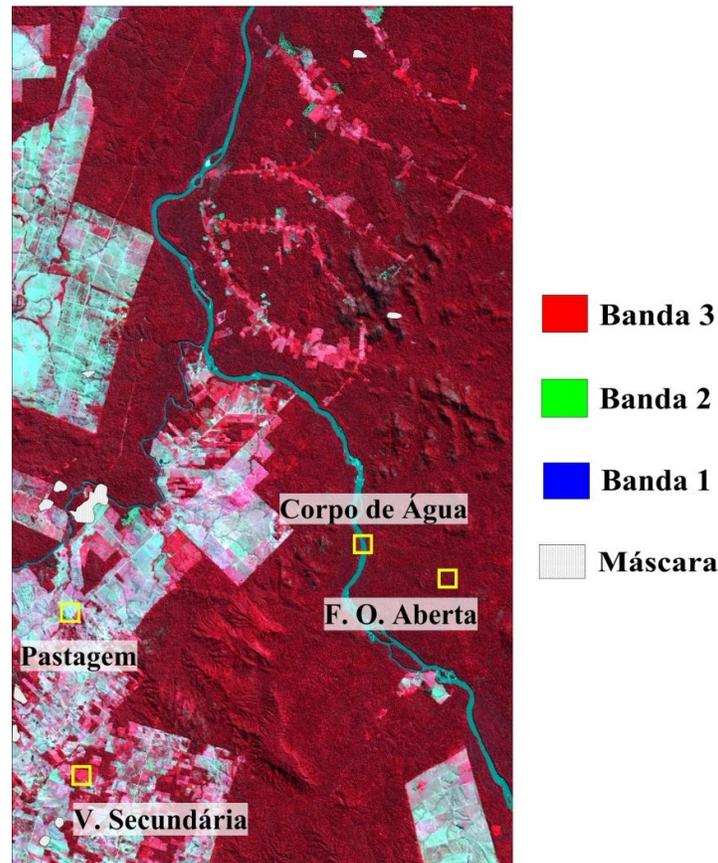


Figura 4. Área de estudo, em imagem ASTER/Terra (composição R3G2B1) de 16/06/2004, com a localização das áreas homogêneas selecionadas para análise.

A Tabela 1 apresenta os valores de R_n nas áreas homogêneas selecionadas para análise nos dias 16/06/2004 e 05/07/2005. A área de floresta ombrófila aberta apresentou um R_n médio, para as duas datas avaliadas, de $538,2 \text{ W m}^{-2}$, sendo que o valor médio em 2005 foi 1,9% inferior ao valor médio estimado para 2004. Santos et al. (2011), utilizando imagens TM/Landsat 5 na região de Ji-Paraná (RO), obtiveram para áreas de floresta nativa, no dia

22/07/2008, um valor médio de 592 W m^{-2} , que é 10% mais elevado que a média obtida para as duas datas na área de floresta ombrófila aberta aqui analisada. Com relação a estudos micrometeorológicos, Aguiar (2007), no sítio experimental da Reserva Biológica do Jaru (RO), encontrou para os meses de junho e julho de 2005, no horário das 11h00, valores em torno de 550 W m^{-2} . Michiles (2009) obteve para uma área de floresta em Manaus (AM), na estação seca, valores próximos a 520 W m^{-2} (horário das 11h00). Como pode se observar, as estimativas de R_n em área de floresta ombrófila aberta concordam bastante bem com estudos micrometeorológicos na região amazônica. A área de vegetação secundária apresentou valores médios de R_n muito próximos, que corresponderam a $500,8 \text{ W m}^{-2}$ em 2004, e $499,7 \text{ W m}^{-2}$ em 2005. Ao considerar o valor médio para as duas datas, verifica-se que o R_n sobre a área de vegetação secundária foi de $500,3 \text{ W m}^{-2}$, o que corresponde a um valor 7% inferior ao observado na área de floresta ombrófila aberta.

Tabela 1. Valores estatísticos de balanço de radiação para as áreas homogêneas selecionadas na área de estudo.

Data	Área selecionada	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
16/06/2004	Floresta Ombrófila Aberta	543,3	531,1	555,0	5,9
	Vegetação Secundária	500,8	492,0	509,5	4,3
	Pastagem	487,1	481,7	495,0	3,6
	Corpo de Água	596,1	590,8	599,3	2,6
05/07/2005	Floresta Ombrófila Aberta	533,1	522,2	551,1	7,3
	Vegetação Secundária	499,7	479,1	513,6	8,5
	Pastagem	479,8	472,8	487,6	3,2
	Corpo de Água	588,2	582,9	593,2	2,8

Na área de pastagem, verificou-se que em 2005 houve uma diminuição de 1,5% do valor médio de R_n com relação ao verificado em 2004. Os valores médios variaram entre 487,1 (16/06/2004) e $479,8 \text{ W m}^{-2}$ (05/07/2005), o que corresponde na média para as duas datas, a um R_n de $483,5 \text{ W m}^{-2}$. Esse valor é, respectivamente, 10,2% e 3,4% inferior às médias obtidas para as áreas de floresta ombrófila aberta ($538,2 \text{ W m}^{-2}$) e vegetação secundária ($500,3 \text{ W m}^{-2}$). Giongo (2011) encontrou valores de R_n em áreas de pastagem no interior de São Paulo variando entre 200 e 460 W m^{-2} , inferiores aos encontrados por este estudo. Santos et al. (2011), que estimaram o balanço de radiação em áreas de pastagem no estado de RO em quatro datas referentes a estação seca, obtiveram valores de 500, 492, 497 e 663 W m^{-2} , ou seja, um valor médio de 538 W m^{-2} . Com relação a estudos observacionais na região amazônica, Wright et al. (1992) obtiveram para a estação seca em uma área de pastagem em Manaus (AM), para o horário das 11h00, valores de $\approx 500 \text{ W m}^{-2}$. Von Randow et al. (2004) encontraram para área de pastagem em Ouro Preto do Oeste (RO), na estação seca, às 11h00, valores de R_n também em torno de 500 W m^{-2} . Verifica-se que os valores observados por estas pesquisas são praticamente idênticos entre si, e são, na média, 3,4% maiores que o encontrado na área de pastagem aqui analisada. O corpo de água foi a área com os maiores valores médios de R_n , que corresponderam a 596,1 e $588,2 \text{ W m}^{-2}$ nos dias tratados em 2004 e 2005, respectivamente. Esses valores concordam com o estudo de Meireles (2007), que encontrou valores de R_n variando entre 410 e 820 W m^{-2} para superfícies cobertas com água.

4. Conclusões

Os valores de balanço de radiação nas áreas homogêneas selecionadas foram coerentes com aqueles obtidos por outras pesquisas em alvos semelhantes. Verificou-se quanto e como a substituição da floresta tropical por pastagem pode modificar os fluxos de energia na

superfície, o que evidencia o potencial da metodologia na avaliação do impacto, em diferentes variáveis climáticas, causado por mudanças no uso e cobertura da terra. A utilização de dados ASTER e o modelo SEBAL em uma região com inúmeras peculiaridades como a Amazônia, onde a cobertura de nuvens e a vasta área territorial são problemáticas, possibilitou a estimativa e espacialização do balanço de radiação de maneira sistemática em uma região onde a maioria das informações são geradas pontualmente.

Agradecimentos

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e a Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor.

Referências Bibliográficas

- Aguiar, L. J. G. **Balanço de radiação em áreas de floresta e de pastagem em Rondônia**. 2007. 70 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 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.
- 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.
- Davidson, E. A.; Araújo, A. C.; Artaxo Netto, P. E.; Balch, J. K.; Brown, I. F.; Bustamante, M. M.; Coe, M. T.; Defries, R. S.; Keller, M.; Longo, M.; Munger, J. W.; Schroeder, W.; Soares-Filho, B. S.; Souza, C. M.; Wofsy, S. C. The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, n. 7381, p. 321- 328, 2012.
- Giongo, P. R. **Mapeamento do balanço de energia e evapotranspiração diária por meio de técnicas de sensoriamento remoto**. 2011. 122 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- Houborg, R.; Soegaard, H.; Emmerich, W.; Moran, S. Inferences of all-sky solar irradiance using Terra and Aqua MODIS satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 20, p. 4509-4535, 2007.
- Liang, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 2, p. 213-238, 2001.
- Meireles, M. **Estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem Landsat 5-TM na bacia do Acaraú-CE**. 2007. 89 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.
- Michiles, A. A. S. **Taxas de armazenamento térmico na biomassa e balanço de energia em superfície para áreas de floresta de terra firme na Amazônia**. 2009. 184 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- Prentice, I. C.; Cramer, W.; Harrison, S. P.; Leemans, R.; Monserud, R. A.; Solomon, A. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. **Journal of Biogeography**, v. 19, n. 2, p. 117-134, 1992.
- Santos, C. A. C.; Nascimento, R. L.; Rao, T. V. R.; Manzi, A. O. Net radiation estimation under pasture and forest in Rondônia, Brazil, with TM Landsat 5 images. **Atmosfera**, v. 24, n. 4, p. 435-446, 2011.
- Von Randow, C.; Manzi, A. O.; Kruijt, B.; Oliveira, P. J.; Zanchi, F. B.; Silva, R. L.; Hodnett, M. G.; Gash, J. H. C.; Elbers, J. A.; Waterloo, M. J.; Cardoso, F. L.; Kabat, P. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, n. 1-3, p. 5-26, 2004.
- Wright, I. R.; Gash, J. H. C.; Rocha, H. R.; Shuttleworth, W. J.; Nobre, C. A.; Maitelli, G. T.; Zamparoni, C. A. G. P.; Carvalho, P. R. A. Dry season micrometeorology of central Amazonian ranchland. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 118, n. 508, p. 1083-1099, 1992.