Análise das componentes do balanço de energia à superfície para a cidade de Manaus-AM a partir de imagens do sensor Landsat 5-TM.

Ayobami Iwa Zenabu Badiru Sílvia Cristina de Pádua Andrade Antônio Marcos Delfino de Andrade Carlos Antonio Costa dos Santos

Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas Universidade Federal de Campina Grande - UFCG Av Aprígio Veloso, 882 - Bairro Universitário 58.109-970 - Campina Grande, Paraíba {ayo.badiru; marcoslaba}@hotmail.com {silviacrisandrade;carlostorm}@gmail.com

Abstract. This research aimed to estimate and analyze the conduct of the surface radiation balance (Rn) in the city of Manaus-AM from information provided by Landsat 5-TM. The use of remote sensing in this context aims to fill a gap in Brazil, where the available data of solar radiation is very limited and mostly refers to climatological averages. For this, we used the procedures of the method "Algorithm for Land Surface Balance" - SEBAL. Was obtained values of the components of Rn-based reflective radiance from the channels (1, 2, 3, 4, 5, and 7) and the thermal channel (6) 5-Landsat TM. For comparative purposes, the main types of land cover were analyzed in the study area: urban area, water bodies, vegetation and bare soil. The emissivity values did not differ significantly between the targets, the values of albedo and surface temperature were directly proportional to the targets while for values Rn and long-wave emission was observed an inverse relationship in which the surfaces with higher emissivity values showed lower Rn. So clear was the contrast between the natural surfaces (vegetation and water bodies) that showed the highest values of Rn, while the urban area and areas of exposed soil showed lower values due to low capacity and high thermal conductivity heat material associated therewith.

Keywords: remote sensing, image processing, algorítmo SEBAL, saldo de radiação.

1. Introdução

O intenso processo de urbanização nas últimas décadas proporcionam diversas consequências de ordem ambiental. Esse crescimento em conjunto as densas transformações nos ambientes naturais, com a substituição de áreas vegetadas por concreto, vem contribuindo para a alteração das trocas de energia entre superfície e atmosfera, favorecendo assim a formação de um clima urbano. De acordo com Nogueira et al. (2007) a cidade de Manaus, capital do Estado do Amazonas, é um exemplo de zona urbana desenvolvida no meio da floresta e que atualmente tem pagado um preço ambiental muito alto por conta da expansão urbana que vem sofrendo nos últimos anos, ao modificar as estruturas do ambiente urbano, que segundo Landsberg (1981) absorve e emite uma quantidade maior de energia em relação a áreas rurais pelo fato de que os materiais típicos de uma superfície urbana apresentam em média albedo menor, capacidade térmica menor e condutividade de calor maior.

A formação de ilhas de calor e o déficit de umidade são algumas das anomalias encontradas em áreas urbanas e a causa direta destes fenômenos está relacionada aos processos de troca de energia, mais especificamente as componentes do balanço de radiação solar (Rn) (White et al. 1978)

A mensuração do Rn à superfície podem ser realizadas a partir de sensores instalados à superfície, denominados saldorradiômetros ou a partir das medidas de suas componentes através de piranômetros (radiação solar incidente e refletida) e pirgeômetros (radiação de onda longa ascendente e descendente); todavia, possibilitam fazer apenas medidas pontuais e há impossibilidade de organizar uma grande rede para grandes regiões. Considerando ainda uma região com ampla extensão territorial, a instalação, calibração e manutenção de uma densa rede de estações tornam-se financeiramente dispendiosas. Em situações como essas, o

uso de informações de satélites se torna atrativo por oferecer cobertura de todo o globo, boa resolução espacial e razoável frequência temporal. Segundo Enoré (2012) apesar da ampla variedade de métodos para as estimativas de Rn por satélite, a complexidade envolvida na interação da radiação com o sistema atmosférico e a grande variabilidade temporal e especial dos fenômenos meteorológicos apresentam barreiras para se avaliar as componentes do saldo de radiação.

Leivas et al.(2012) relatam que os dados disponíveis de radiação solar são muito limitados n o Brasil, e que a maioria se refere a médias climatológicas, onde é fornecido o número de horas de brilho solar, ou insolação, e não a energia incidente. Algumas universidades e órgãos governamentais operam radiômetros, mas isso ainda é insuficiente. Para preencher esta lacuna, o sensoriamento remoto é uma ferramenta que tem possibilitado a estimativa de parâmetros como radiação solar global, albedo da superfície, índices de vegetação, emissividade da superfície, temperatura da superfície e balanço de radiação.

Com base no que foi exposto, o objetivo do presente trabalho é estimar e analisar o comportamento do balanço de radiação à superfície na cidade de Manaus-AM partir de informações provenientes do sensor do satélite LANDSAT 5-TM.

2. Metodologia

A área de estudo corresponde ao município de Manaus (03°08' S; 60° 01' W; alt. 21m.), capital do Estado do Amazonas e a maior região metropolitana da região Norte do Brasil. Localiza-se no centro da Floresta Amazônica, na confluência dos Rios Negro e Solimões (Figura 1).



Figura 1. Localização do Município de Manaus – AM.

Foram utilizadas as sete bandas espectrais das imagens do sensor Landsat 5-TM (órbita 233, ponto 60), registradas na data de 27 de julho de 2010 às 14hrs 03 min, com as características espectrais apresentadas pela Tabela 1.

Tabela 1Descrição das bandas espectrais do sensor Landsat 5-
TM e seus respectivos coeficientes de calibração

segundo Chander e Markham.										
Descrição das bandas*		Comprimento	Coeficientes o (W m ⁻² s	K I						
		ue onua (µm)	а	b	(w iii - µiii -)					
Banda 1	(Azul)	0,45 - 0,52	-1,765	178,941	1957					
Banda 2	(Verde)	0,52 - 0,60	-3,576	379,055	1829					
Banda 3	(Vermelho)	0,63 - 0,69	-1,502	255,695	1557					
Banda 4	(IV próximo)	0,76 - 0,90	-1,763	242,303	1047					
Banda 5	(IV médio)	1,55 – 1,75	-0,411	30,178	219,3					
Banda 6	(IV termal)	10,4 - 12,5	1,238	15,600	_					
Banda 7	(IV médio)	2,08 - 2,35	-0,137	13,156	74,52					

* IV - Infravermelho

Para a obtenção de informações de fluxo de energia à superfície das imagens, utilizou-se o algoritmo computacional SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) propostos por Bastiaanssen et al. (1998) aplicado às imagens através de modelos matemáticos no software de tratamento de imagens digitais Erdas Imagine 9.1. As etapas de execução do algoritmo SEBAL estão representadas na Figura 02.



Figura 2. Fluxograma das etapas do algorítmo SEBAL.

Deste fluxograma, a calibração radiométrica, a reflectância monocromática e o albedo planetário foram calculados de acordo com os procedimentos descritos por Giongo et al. (2010). O albedo da superfície (r_0), que corresponde a razão entre a radiação solar refletida pela radiação solar incidente na superfície foi calculado pela equação:

$$r_0 = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path_radiancs}}{\tau_{sw}^2}$$
(1)

Onde α toa é o albedo planetário, α path radiance é a porção da radiação solar refletida pela atmosfera; (Bastiaanssen, 2000) diz que $\alpha_{path_radiance} = 0.03$ e t_{sw} é a transmissividade atmosférica, que é definida como a fração da radiação solar incidente transmitida pela atmosfera e representa o seu efeito de absorção e reflexão (Allen et al., 2002). A transmissividade atmosférica é computada em função da altitude local (z), na equação:

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} \times z \tag{2}$$

Os Índices de Vegetação calculados foram Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN), o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS) e o Índice de Área Folhear (IAF); obtidos respectivamente pelas equações a seguir:

$$IVDN = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3}$$
(3)

$$IVAS = (1+L)\frac{(\rho_3 - \rho_4)}{(L+\rho_3 + 4)}$$
(4)

$$IAF = -\frac{ln\left(\frac{0,69 - IVAS}{0,59}\right)}{0,91}$$
(5)

Onde: ρ_4 e ρ_3 são respectivamente as reflectâncias monocromáticas das bandas do vermelho e infra-vermelho e os valores de L corresponderam a 0,5 (Hueste, 1988) e L= 0,1 (Tasumi, 2003). A partir dos valores obtidos do IAF, a emissividade termal (ϵ NB) e de superfície (ϵ o) foram calculadas:

$$\varepsilon_{NB} = 0.97 + 0.0331IAF$$
 (6)
 $\varepsilon_0 = 0.95 + 0.01IAF$ (7)

O cálculo da temperatura da superfície (T_s) foi feito através da equação de Planck invertida, proposta para um corpo negro, para o qual a emissividade é igual a 1. Como cada pixel não constitui um corpo negro, há necessidade de se estabelecer a sua emissividade no domínio espectral da banda termal (ε_{NB}), para fins do cômputo da T_s , bem como no cômputo da radiação de onda longa emitida pela superfície, que nesse caso é considerada a emissividade da banda larga (ε_0) (4 – 100 µm). Sendo K₁ = 607,8 e K₂ = 1261 Wm⁻²sr⁻¹µm⁻¹.

$$T_{s} = \frac{K_{2}}{ln\left(\frac{\varepsilon_{\rm NB}K_{1}}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \tag{8}$$

A Radiação de Onda Longa Emitida ($R_{L\uparrow}$), que representa o fluxo de radiação termal emitida pela superfície, foi obtida pela equação de Stefan-Boltzmann, onde σ é a constante de Boltzmann (5,67x10⁻⁸ W m⁻² K⁻⁴).

$$R_{L} \uparrow = \epsilon_{0} \sigma T_{s}^{4}$$
⁽⁹⁾

A Radiação de Onda Longa Incidente ($R_{L\downarrow}$) pela atmosfera na direção da superfície, obtida pela equação de Stefan-Boltzmann, foi calculada em função da emissividade do ar ϵ_a da temperatura do ar $T_{a,:}$

$$R_{L} \downarrow = \varepsilon_{a} \sigma T_{a}^{4} \tag{10}$$

Onde ε_a é a emissividade da superfície, dada por:

$$\varepsilon_a = 0.85 (-ln\tau_{sw})^{0.09} \tag{11}$$

A Radiação de Onda Curta Incidente (Rs \downarrow), foi dada pela equação, onde G_{sc} é a constante solar (1367 W m^{-2}).

$$R_{s} \downarrow = G_{cs} \cos\theta d_{r} \tau_{sw}$$
(12)

O Saldo de Radiação (Rn) foi obtido pela equação a seguir, propostas por Allen et al. (2002) e Tasumi et al. (2005).

$$R_{n} = (1 - \alpha)R_{s} \downarrow + R_{L} \downarrow - R_{L} \uparrow - (1 - \varepsilon_{0})R_{L} \downarrow$$
(13)

3. Resultados e Discussões

Para fins comparativos, foram analisados os valores médios de IVDN, radiação de onda longa emitida pela superfície, saldo de radiação, emissividade, albedo e temperatura da superfície. Estes valores médios foram obtidos para diferentes tipos de cobertura da área estudada: Àrea urbana, corpos d'água, vegetação e solo exposto, como mostra a Tabela 2.

	radiação.					
	Emissividade (superfície)	IVDN	Albedo superfície	Temperatura de superfície (°C)	Onda longa (W m ⁻²)	Saldo de radiação (W m ⁻²)
Área urbana	0.962	0.19	0.19	26	425	530
Corpo d'água	0.985	-0,2	0.026	18	400	655
Solo exposto	0.960	0.2	0.20	24.5	430	525
Vegetação	0.970	0.68	0.15	19.2	398	610

Tabela 2. Valores médios obtidos para as componentes analisadas do saldo de

De acordo com a anterior, observa-se que os valores de emissividade da superfície (ε_0) não sofreram grandes alterações entre os alvos analisados. Para a área urbana e solo exposto os valores foram iguais (0.962), enquanto que os maiores valores corresponderam aos corpos d'água (0.985) e à vegetação (0.970). A razão disto reside no fato da absortividade ser maior nas superfícies líquidas do que em solo exposto ou com vegetação natural.

Ouaidrari et al. (2002) afirmam que a emissividade pode ser a maior fonte de erros na estimativas de temperatura de superfície utilizando imagens de satélites, não obstante, o intervalo de valores de emissividade para solo exposto apresentado por Morse et al. (2000) (0.92 - 0.96) compreende o valor obtido nesta pesquisa, assim como o valor obtido para a área urbana se aproxima ao de 0.968, arbitrado por Allen et al. (2002).

Como esperado, os valores máximos de IVDN corresponderam à vegetação (0.68) enquanto que os valores mínimos foram aos corpos d'água (-0.2), para a área urbana e solo exposto à variação deste índice foi mínimo apresentando valores médios de 0.19 e 0.20 respectivamente.

Os valores médios de albedo de superfície variaram entre o mínimo para os corpos d'água (2,6%) e máximo para o solo exposto (Figura 3A). Vale ressaltar que, assim como o IVDN, os valores referentes à área urbana (19%) e ao solo exposto foram muito próximos, enquanto que o da vegetação foi de 15%.

Os maiores valores médios de temperatura de superfície corresponderam à área urbana (26°C) e ao solo exposto (24.5°C), seguidos da vegetação (19.2°C) e dos corpos d'água (18°C), este resultado apresenta claramente o contraste de valores entre às regiões antropomorfizadas e as áreas naturais, que apresentaram menores temperaturas. Este contraste também está apresentado na Figura 3B, na qual os maiores valores de temperatura estão representadas pela área urbana e pelo solo exposto, mais clara.



Figura 3. Imagem apresentando os valores do albedo de superfície (A) e de temperatura de superfície (B).

Percebe-se uma relação inversamente proporcional entre os valores de emissão de onda longa e o saldo de radiação na superfície. Os menores valores de emissão de onda longa corresponderam à vegetação (398 W m⁻²) e aos corpos d'água (400 W m⁻²) enquanto que os mesmos apresentaram os maiores valores de saldo de radiação (610 e 655 W m⁻², respectivamente). Os valores de saldo de radiação para a área urbana e para o solo exposto foram menores devido a alta condutividade térmica presente nos mesmos. Este contraste é evidenciado na Figura 4 em que os maiores valores da imagem de saldo de radiação (A) são apresentados com os menores valores (mais escuros) na imagem de onda longa emitida (B).



Figura 4. Imagem apresentando os valores do saldo de radiação (A) e de radiação de onda longa emitida pela superfície (B).

4. Conclusão

Os valores obtidos de saldo de radiação utilizando o sensor do satélite Landsat 5-TM corresponderam com o esperado, no qual foram encontrados os maiores valores nas superfícies naturais por apresentarem baixa condutividade térmica quando comparadas às superfícies urbanas e ao solo exposto. Entretanto, é aconselhável para futuras pesquisas a utilização de informações topográficas contidas em modelos de elevação digitais para fins comparativos.

5. Citações e Referências

Allen, R.G., Trezza, R.Tasumi M. Surface Energy Balance Algorithms for Land. Advance training and users manual, version 1.0, pp.98, 2002.

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. PhD. Dis., CIP Data Koninklijke Biblioteheek, Den Haag, the Netherlands. 272 p., 1995.

Enoré, D. P. **Estudos de saldos de radiação à superfície estimados por satélites.** 2012. 116 p. (sid.inpe.br/mtc-m18/2012/02.09.16.16-TDI). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2012.

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**, vol.14, n.3, pp. 279-287. 2010.

Landsberg, H. E.: The Urban Climate. New York-NY: Academic Press, 1981. 271p.

Leivas, J.; Gusso, A.; Fontana, D. C.; Berlato, M. Estimativa do balanço de radiação na superfície a partir de imagens do satélite ASTER. In. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13. 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. Artigos, p. 255-262. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: http://marte.dpi.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.18.31> Acesso em: 11 nov. 2012.

Morse, A.; Tasumi, M.; Allen, R. G.; Kramber, W. J. Aplication of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and streamflow deplition in the Bear River basin of Idaho through remote sensing – Final Report. Boise: Department of Water Resources/University of Idaho, 2000, 98p.

Nogueira, A. C. F.; Sanson, F.; Pessoa, K. A expansão urbana e demográfica da cidade de Manaus e seus impactos ambientais. In. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13. 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. Artigos, p. 5427-5434. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: < http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.14.17.45/doc/5427-5434.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2012.

Ouaidrari, H.; Goward, S. N.; Czajkowski, K. P.; Sobrino, J. A.; Vermote, E. Land surface temperature estimation from AVHRR thermal infrared measurements: An assessment for the AVHRR Land Pathfinder II data set. Remote Sensing of Environment, v.81, n.1, p.114-128, 2002.

Tasumi, M. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. Idaho: University of Idaho, 2003. 378p. PhD thesis

White, J.M.; Eaton, F.D.; Auer, A.H. The Net Radiation Budget of the St. Louis Metropolitan Area. Journal of Applied Meteorology, v. 17, n. 5, p. 593-599, 1978.