

## Surface radiation balance and the land use in the amazon region

Ana Paula N. da Silva<sup>\*</sup>, Liana P. Belúcio<sup>\*\*</sup>, Danilo B. Nogueira<sup>\*\*\*</sup>, Alessandro O. da Silva<sup>\*\*\*\*</sup>, Bernardo B. da Silva<sup>\*\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Doutora em Meteorologia, Universidade do Estado do Amapá, Macapá, Amapá, apns@ymail.com (autor correspondente)

<sup>\*\*</sup>Bacharel em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Amapá, Macapá, Amapá, lianabelucio@hotmail.com

<sup>\*\*\*</sup>Mestrando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, danilonogueira.agro@gmail.com

<sup>\*\*\*\*</sup>Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, alexsandro@ufc.br

<sup>\*\*\*\*\*</sup>Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, bbdasilva.ufpe@gmail.com

Received 24 July 2017; accepted 15 September 2017

### Abstract

The goal of this study is to verify the relationship between the change in land use and occupation and the balance of surface radiation in the Macapá Metropolitan Area (RMM), which is placed in the Legal Amazon Northeast, due to the fact of the fast urbanization of the area. The development of the urban areas causes changes on the cover and use of the soil which could have a direct effect on the surface energy balance that may result in atmospheric modification in a local, or even regional, scale. In order to verify the RMM urban development, were used images from LANDSAT TM and OLI/TIRS of five different periods. Therefore, through the supervised classification MAXVER, it was possible to verify an expansion of the build-up area, the class of soil that covers the urban sheet, between 1986 and 2015. The data collected showed the biggest thermal changes took place further from the city, due to changes in the use of the soil in the isolated region of the RMM. Since the expansion of the urban network of the RMM occurs in the SW and S directions, with emphasis on the Fazendinha district, which is located between the center of Macapá and the center of the city of Santana.

Keywords: Urban growth, remote sensing, SEBAL algorithm.

### Saldo de radiação e uso do solo em região amazônica

#### Resumo

O objetivo deste trabalho foi verificar a relação entre a mudança do uso e ocupação do solo e o saldo de radiação em superfície na Região Metropolitana de Macapá (RMM), situada no Nordeste da Amazônia Legal, já que esta região vem apresentando um rápido processo de urbanização. Este processo de crescimento urbano provoca mudanças na cobertura e uso do solo, que podem modificar diretamente o balanço de energia em superfície gerando modificações na atmosfera que podem variar da escala local até a regional. Para verificar o crescimento urbano da RMM utilizou-se imagens do LANDSAT TM e OLI/TIRS de cinco diferentes épocas e através da classificação supervisionada MAXVER, verificou-se a expansão da classe área construída entre 1986 e 2015, classe que subentende a malha urbana. Verificou-se que as maiores mudanças térmicas ocorreram na área mais afastada da cidade, fato devido às mudanças de uso do solo na região periférica da RMM, já que a expansão da malha urbana da RMM se dá nas direções, SW e S, com destaque para o distrito de Fazendinha, que se localiza entre o centro de Macapá e o centro da cidade de Santana.

Palavras-Chave: crescimento urbano, sensoriamento remoto, algoritmo SEBAL.

#### 1. Introdução

O crescimento acentuado e desordenado que algumas cidades vivenciaram no século XX causou bruscas mudanças no uso do solo. A remoção da vegetação e sua substituição por materiais como

concreto, asfalto, metais e vidros, que possuem capacidade térmica de absorção

maior que a vegetação natural, favorece a absorção da energia solar na superfície durante o dia e emissão de ondas longas à noite, causando a elevação das

temperaturas sobre as áreas urbanizadas (Lombardo, 1985).

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2012), desde 1950 houve um processo gradual de ocupação das áreas antes vazias ou interioranas, em grande parte relacionado com o desenvolvimento da fronteira agrícola e projetos de desenvolvimento econômico, como foi o caso de Belém e Manaus. Em Macapá, em 1950, foi implantado no território uma base administrativa para o projeto da Indústria e Comércio de Mineração (ICOMI), que teve seu início no município de Santana (vizinho à capital do Amapá) com a implantação de um porto, para escoamento do manganês e com a construção de uma vila operária, para abrigar seus funcionários. O projeto ICOMI trouxe grandes modificações para os municípios de Macapá e Santana, de forma que a expansão de seus bairros foi ocorrendo de forma acelerada.

As mudanças no Balanço de Energia em Superfície (BES) podem ser geralmente observadas nas áreas urbanas, com aumento na radiação solar refletida e aumento na emissão de radiação infravermelha, diminuição nos valores do fluxo de calor latente e aumento nos valores de fluxo de calor sensível, aumento no armazenamento de energia em superfície através de prédios e obstáculos, além da adição do termo de emissões de calor antropogênico na equação do BES (Souza, 2012).

Estudos dessa natureza fornecem subsídios ao planejamento urbano, bem como pode auxiliar no desenvolvimento de políticas públicas que resultem em melhoria da qualidade de vida dos habitantes, já que a elevação da temperatura provoca o estabelecimento de zonas de menor pressão em superfície e, este gradiente térmico facilita a movimentação do ar em direção aos pontos mais quentes e, conseqüentemente, o possível transporte de poluentes para essas áreas.

Esta pesquisa teve por objetivo verificar a relação da mudança do uso e ocupação do solo e o

saldo de radiação da Região Metropolitana de Macapá.

## 2. Material e métodos

A área em estudo é a RMM (Figura 1), criada em 26 de fevereiro de 2003, a qual compreende os municípios de Macapá e Santana. Possui área aproximada de  $7,99 \cdot 10^3 \text{ km}^2$  (Resolução nº 5 de 10 de outubro de 2002) e densidade demográfica de  $63,1 \text{ hab.km}^{-2}$  (IBGE, 2010) e abrange dois municípios: a capital Macapá ( $0,04^\circ\text{N}$ ,  $51,07^\circ\text{W}$ , 12 m) e Santana ( $0,06^\circ\text{S}$ ,  $51,18^\circ\text{W}$ , 12 m); situadas à margem esquerda do rio Amazonas que, formam uma malha ortogonal de ruas paralelas ao rio Amazonas e avenidas transversais a ele.

A região possui clima do tipo tropical chuvoso, que se caracteriza por apresentar chuvas do tipo monção, com nítida estação seca, onde a temperatura média nunca é inferior a  $18^\circ\text{C}$  e a oscilação anual, de modo geral, é sempre inferior a  $5^\circ\text{C}$  e, chuva anual média de 2.500 mm. Por conta da proximidade das duas cidades estudadas e da ausência de dados meteorológicos da cidade de Santana, subentende-se que ambas possuem as mesmas características climáticas.

Com a técnica de sensoriamento remoto, fez-se o cálculo e análise do saldo de radiação na superfície da RMM. O satélite LANDSAT 5 transporta o sensor Thematic Mapper (TM) que possui uma resolução espacial de 30 m para as seis bandas refletivas e 120 m na banda termal. O LANDSAT 8 transporta os sensores OLI/TIRS, com resolução espacial de 30 m para as oito bandas relativas e duas termal e inclui uma banda pancromática (pan) com uma resolução de 15 m. Sendo que a banda com resolução mais adequada aos estudos de sensoriamento remoto para cálculo de temperatura, radiação e fluxos de calor é a do infravermelho termal, banda 6 para o LANDSAT 5 e 10 para o LANDSAT 8, com 120 m e 100 m de resolução espacial, respectivamente.

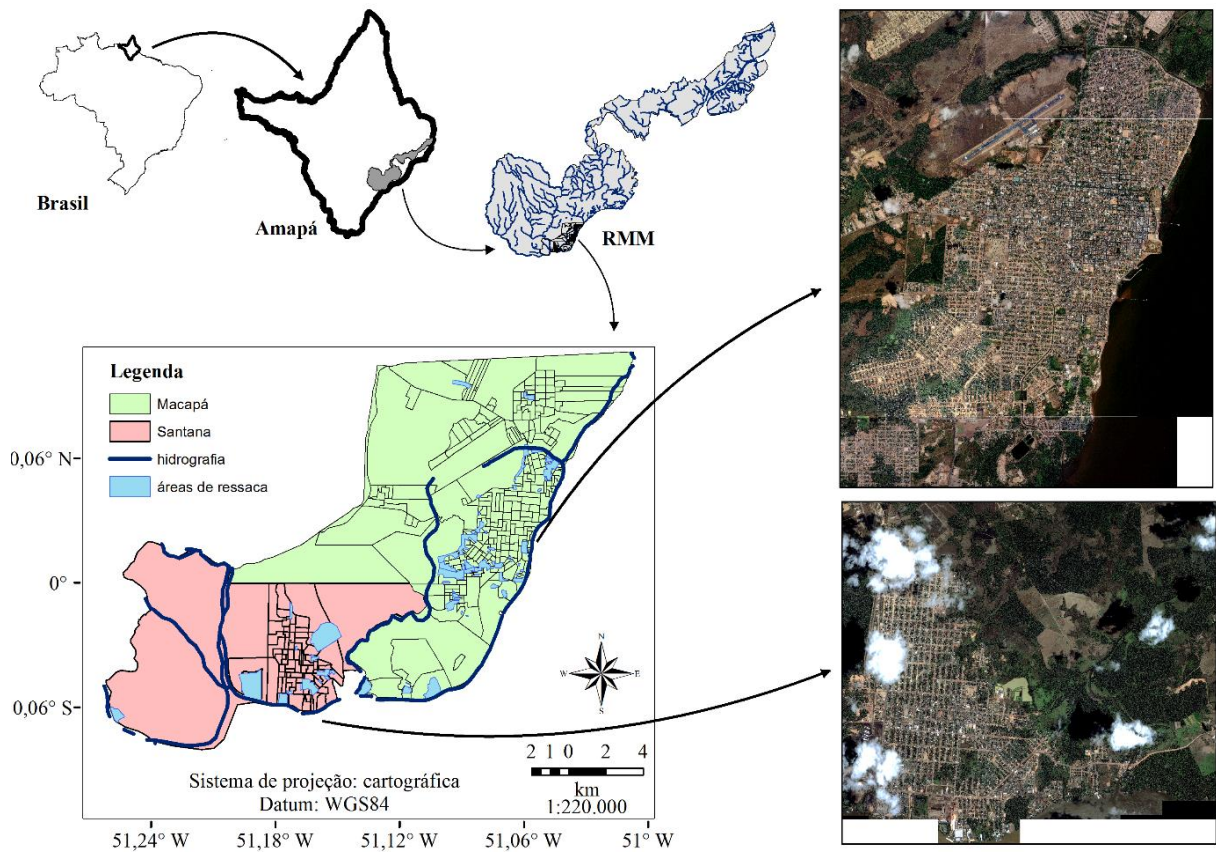


Figure 1 - Localização da área em estudo. Fonte: base de dados do IBGE e SIPAM, elaborado pelos autores.

As imagens destes satélites estão disponíveis no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e no Serviço de Levantamento Geológico Americano (USGS) referentes aos anos 1986, 1991, 2006, 2008 e 2015 (Tabela 1), e o arquivo shape que contém os dados vetoriais da RMM foi adquirido pela plataforma do IBGE.

Tabela 1 - Informações das imagens adquiridas para processamento.

Satélite	Data de captura	Fonte	Órbita	Ponto
Landsat 5	15 de julho de 1986	INPE	225	60
	18 de novembro de 1991			
	26 de outubro de 2006			
	29 de setembro de 2008			
Landsat 8	1 de setembro de 2015	USGS		

O Modelo de Elevação Digital do Terreno (DEM) foi obtido gratuitamente no site do INPE, com resolução espacial de 30 x 30 m.

Para a caracterização dos diferentes usos de solo, bem como definir a malha urbana, foi usado o software ENVI através de classificação supervisionada da máxima verossimilhança (MAXVER). As bandas utilizadas para o mapeamento foram 5, 3 e 4 do Landsat 5 e 6, 4 e 5 do Landsat 8, na composição colorida B (blue), R (red) e G (green).

Segundo Leite e Rosa (2012) e Silva et al. (2013), MAXVER é um algoritmo paramétrico, que associa classes considerando pontos individuais da imagem e assume que essas classes possuem distribuição normal, a partir dos parâmetros definidos e uma amostra de pixels adquiridas a priori, o algoritmo computa a probabilidade estatística de um pixel desconhecido pertencer a uma ou outra classe.

Primeiramente, foram selecionadas imagens da área em estudo, considerando-se mínima cobertura de nuvens. Após a seleção, as imagens foram registradas e, em seguida, fez-se o recorte dos limites da RMM, com o objetivo de agilizar o processamento das imagens. O processo de mapeamento das áreas urbanas foi realizado através de classificação visual, sendo mapeado primeiramente o ano de 1986 e,

posteriormente, os anos seguintes, sempre utilizando como base o mapeamento da data anterior.

Liu (2006) destaca que o MAXVER é um procedimento que envolve estimativas de valores médios de cada classe e da matriz de covariância de acordo com o padrão das amostras de treinamento para classificar a imagem.

A partir das imagens adquiridas e para o tratamento e obtenção das cartas temáticas de saldo de radiação e do fluxo de calor sensível, usou-se o algoritmo Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), proposto por Bastiaansen et al. (1998).

#### Calibração radiométrica ou radiância espectral

Essa radiância representa a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medida ao nível do satélite LANDSAT (705 Km) para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7; para a banda 6, essa radiância

representa a energia emitida por cada pixel. No cálculo da radiância espectral de cada banda ( $L_{\lambda_i}$ ), ou seja, efetivação da calibração radiométrica, o número digital ( $ND$ ) de cada pixel da imagem foi convertido em radiância espectral monocromática. Sua calibração é efetivada segundo a Equação 1, proposta por Markham e Baker (1987):

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

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

Tabela 2 - Descrição das bandas do sensor TM do LANDSAT 5.

Banda	Comprimento de onda ( $\mu m$ )	Coeficientes de Calibração ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ )		Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ( $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ )
		LMIN $_{\lambda}$	LMAX $_{\lambda}$	
			(até 4/5/2003)	(após 5/5/2003)
1	0,452 – 0,518	-1,52	152,1	193,0
2	0,528 – 0,609	-2,84	296,1	365,0
3	0,626 – 0,693	-1,17	204,3	264,0
4	0,776 – 0,904	-1,51	206,2	221,0
5	1,567 – 1,784	-0,37	27,19	30,2
6	10,45 – 12,42	1,2378	15,303	15,303
7	2,097 – 2,349	-0,15	14,38	16,5

Fonte: Chander et al. (2009).

Para o LANDSAT 8, sensor OLI/TIRS, o cômputo da radiância espectral foi obtida pela Equação 2 (USGS, 2014):

$$L_{\lambda_i} = FM \cdot ND + FA \quad (2)$$

em que: FM é o fator multiplicativo; e, FA o fator

aditivo de conversão específico de cada banda, neste caso das bandas 2 a 7, disponíveis no metadados da imagem.

Na Tabela 3 os coeficientes foram extraídos do arquivo de metadados da imagem, conforme Silva et al. (2016).

Tabela 3 - Descrição das bandas dos sensores OLI/TIRS do LANDSAT 8.

Banda	Comprimento de onda (µm)	FM	FA	Coeficientes de Calibração (Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> µm <sup>-1</sup> )		Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera (Wm <sup>-2</sup> µm <sup>-1</sup> )
				LMIN <sub>λ</sub>	LMAX <sub>λ</sub>	
2	0,45-0,51	0,0126	-63,11773	-63,10511	764,1664	1982
3	0,53-0,59	0,0116	-58,16245	-58,15082	704,17279	1827
4	0,64-0,67	0,0098	-49,04586	-49,03605	593,79816	1540
5	0,85-0,88	0,0060	-30,01362	-30,00762	363,37488	942
6	1,57-1,65	0,0015	-7,46411	-7,46262	90,36803	234
7	2,11-2,29	0,0005	-2,51581	-2,5153	30,45886	79

Fonte: USGS (2015), adaptado pelos autores.

### Reflectância

O cômputo da reflectância monocromática de cada banda ( $\rho_{\lambda_i}$ ), definida como sendo a razão entre o fluxo de radiação refletida e o fluxo de radiação incidente, foi obtido segundo a Equação 3 (Allen et al., 2002).

$$\rho_{\lambda_i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda_i}}{k_{\lambda_i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (3)$$

em que:  $L_{\lambda_i}$  é a radiância espectral de cada banda;  $k_{\lambda_i}$ , irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera (Wm<sup>-2</sup>µm<sup>-1</sup>),  $z$ , ângulo zenital solar;  $e$ ,  $d_r$ , quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol ( $r_0$ ) e a distância Terra-Sol ( $r$ ) em dado dia sequencial do ano ( $DSA$ ), que de acordo com Iqbal (1983), é dada pela Equação 4.

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{DSA \cdot 2\pi}{365}\right) \quad (4)$$

em que o argumento da função COS está em radianos.

Quando a área de estudo tem pequena, ou mesmo declividade nula, o cosseno do ângulo de incidência da radiação solar é simplesmente obtido a partir do ângulo de elevação do Sol ( $E$ ), que se encontra no cabeçalho da imagem, ou seja, obtido pela Equação 5:

$$\cos Z = \cos\left(\frac{\pi}{2} - E\right) \quad (5)$$

em que o argumento do COS está em radiano.

### Temperatura da superfície

Para a obtenção da temperatura da superfície ( $T_s$ ) foram utilizados a radiância espectral da banda termal  $L_{\lambda,6}$  e a emissividade  $\epsilon_{NB}$ :

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (6)$$

em que:  $K_1$  e  $K_2$  são constantes de calibração da banda termal do LANDSAT 5 e 7, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Constantes de calibração da banda termal dos sensores TM e ETM+.

Satélite / sensor	Constantes de Calibração	
	K1 (Wm <sup>-2</sup> sr <sup>-1</sup> µm <sup>-1</sup> )	K2 (K)
LANDSAT 5 TM	607,76	1260,56
LANDSAT 7 ETM+	666,09	1282,71
LANDSAT 8/ TIRS-1	774,89	1321,08

Fonte: LANDSAT 7 Science User Data Handbook (2002).

Para o cálculo da temperatura de superfície da imagem do satélite LANDSAT 8, utilizou-se apenas a banda 10 (TIRS-1) após calibração, a Equação 7 (USGS, 2014):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda,10}} + 1\right)} \quad (7)$$

em que:  $K_1$  e  $K_2$  são as constantes de conversão específicas da banda 10, disponíveis no ficheiro de metadados da imagem.

### Saldo de radiação

É dado pelo cômputo dos fluxos ascendentes e descendentes das radiações de onda longa e curta na atmosfera a partir da Equação 8 (Allen et al., 2002):

$$Rn = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o) R_{L\downarrow} \quad (8)$$

em que:  $R_{s\downarrow}$ , é a radiação de ondas curtas incidente ( $W.m^{-2}$ ),  $\alpha$ , albedo da superfície (adimensional),  $R_{L\downarrow}$ , radiação de onda longa incidente ( $W.m^{-2}$ ),  $R_{L\uparrow}$ , radiação de onda longa emitida ( $W.m^{-2}$ ); e,  $\varepsilon_o$ , emissividade termal à superfície (adimensional). O termo  $(1 - \varepsilon_o)$  representa a fração da radiação de onda longa incidente que é refletida pela superfície.

### 3. Resultados e discussão

Os resultados obtidos com a aplicação do classificador MAXVER permitiu a definição de sete classes: nuvem, sombra de nuvem, corpo hídrico, solo exposto, área construída, floresta sucessional inicial/pasto e floresta sucessional secundária/ombrófila densa.

Na classe Solo exposto, estão incluídas rodovias, áreas de exposição total do solo como os locais de extração de areia, de exposição parcial da terra devido ao início de novos ciclos de cultura e áreas degradadas. Na classe Área construída está incluída áreas urbanas.

A classe Floresta Sucessional Inicial/Pasto representa grande quantidade de ervas e arbustos e poucas árvores (Almeida et al., 2010). Apresenta-se espectralmente com textura lisa a média, com cobertura vegetal uniforme e rala (Almeida e Vieira, 2008).

A categoria Floresta Sucessional Secundária/Ombrófila Densa é composta tanto das Florestas Ombrófilas Densas de Igapó como as de Terra Firme. Os padrões espectrais destas florestas aparecem com tonalidades escura e a textura lisa ou mosqueada (Almeida e Vieira, 2008).

Deste modo, observa-se pela Figura 2 que houve um aumento na classe “área construída” entre 1986 e 2015, sendo que nesta classe se enquadra a superfície urbana da RMM. Este aumento na área urbana muda os fluxos em superfície, podendo gerar ICU, ocasionando desconforto ambiental para a população.

De acordo com os dados obtidos o crescimento da malha urbana da RMM demonstra que no ano de 1986 (Figura 2A) a cidade apresentava urbanização concentrada basicamente numa pequena área na região central da RMM às margens do rio Amazonas.

Em 1991 (Figura 2B) a RMM passa por um crescimento e sua área construída passa a adentrar na RMM e a classe de solo exposto apresenta área significativa nas regiões norte e oeste da RMM, indicando áreas desmatadas destinadas a loteamentos residenciais, como pode se observar nas imagens seguintes. Por último, vê-se que em 2015 (Figura 2E), com a imagem do OLI/LANDSAT 8 de 2015, fica evidente a expansão da classe “área construída” inclusive nas áreas antes consideradas como “solo exposto”.

Deste modo, percebe-se o crescimento da RMM primeiramente se deu em direção ao norte, posteriormente a regiões oeste da área e agora se dá em direção a região Sul, porém, com algumas áreas de crescimento, isoladas, nas adjacências da malha urbana. Destaca-se também o crescimento do distrito de Fazendinha ( $0,06^{\circ}S$ ,  $51,12^{\circ}W$ ), que se localiza entre o centro de Macapá e o centro da cidade de Santana fazendo com que a mancha urbana seja contínua entre os dois municípios, local onde se encontra instalada a EMA do INMET.

O grande número de superfícies na cidade origina reflexões múltiplas entre os prédios, que alteram o balanço radiativo local, disponibilizando à superfície da cidade uma maior quantidade de energia a ser usada como fluxo de calor sensível.

As áreas de floresta apresentam maior índice de vegetação decorrente de maior biomassa, o que influencia diretamente no balanço de radiação e, posteriormente no balanço de energia local, acarretando mudança no particionamento de energia destinada ao calor sensível, latente e aquecimento do solo (Biudes et al., 2015).

O saldo de radiação (Rn) resulta no balanço entre os fluxos radiativos descendentes e ascendentes de onda curta e onda longa. Seus valores variam em função características da superfície, como uso e ocupação do solo, albedo, umidade e temperatura do solo. De acordo com Silva et al. (2005) o Rn exerce papel fundamental nos processos de troca de calor e massa na baixa troposfera, uma vez que constitui o principal responsável pelo aquecimento do solo, do ar e, sobretudo, pela evapotranspiração da vegetação. O grande número de superfícies na cidade origina reflexões múltiplas entre os prédios, que alteram o balanço radiativo local, disponibilizando à superfície

da cidade uma maior quantidade de energia a ser usada

como fluxo de calor sensível.

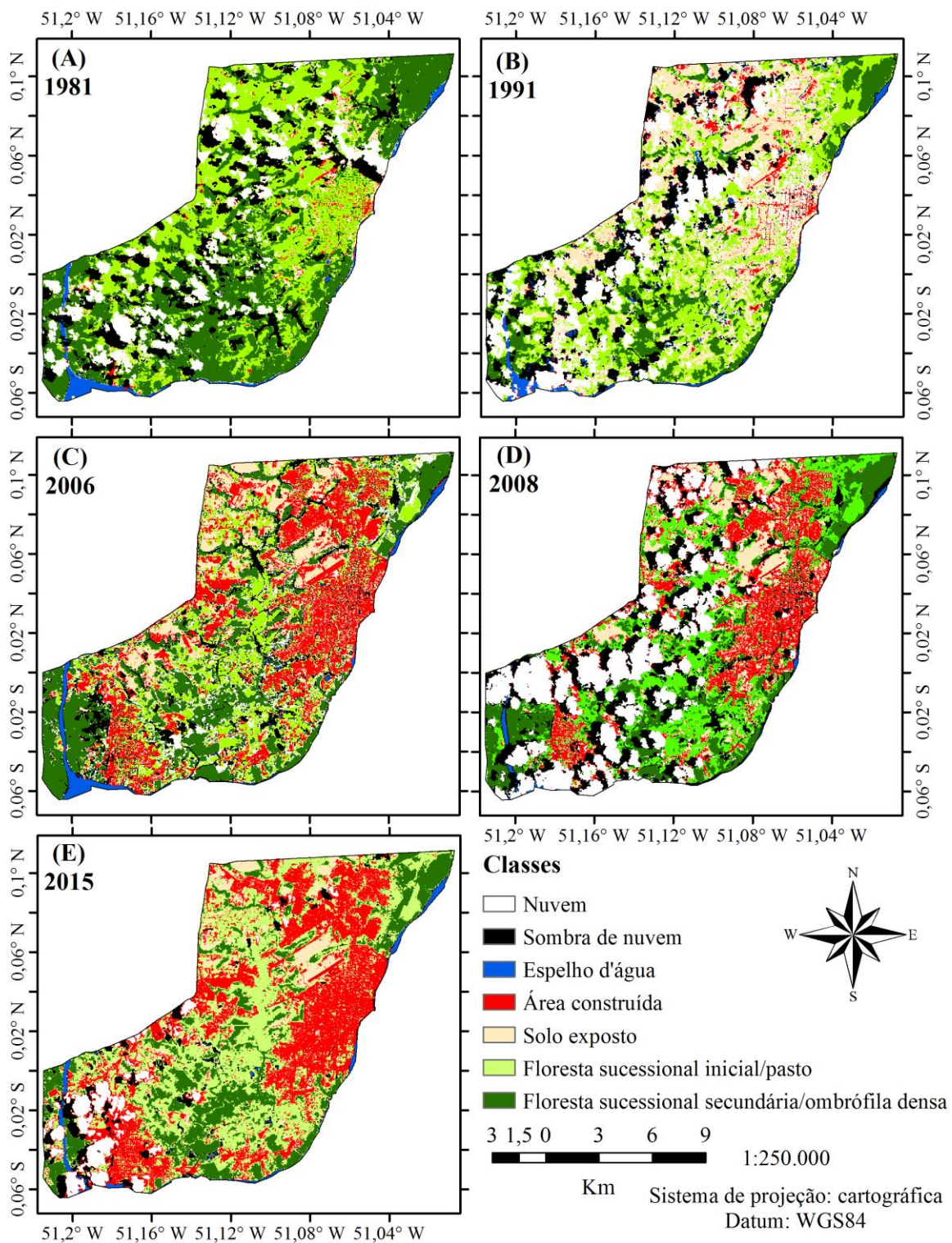


Figure 2 - Cartas de uso do solo na Região Metropolitana de Macapá (RMM).

As variações no Rn são fundamentais nos processos atmosféricos e terrestres alterando, por

exemplo, a temperatura na superfície, o perfil da taxa vertical de aquecimento e a circulação atmosférica

(Souza et al., 2008). Vale lembrar que quantidade de energia que chega à superfície (Rni) é determinada pela radiação solar incidente e pela radiação atmosférica, porém, a energia armazenada no sistema (balanço de energia) é determinada pelo tipo de cobertura, variando com o coeficiente de refletividade, que é função da coloração e da rugosidade. Em sistemas vegetados a energia global que chega a superfície pode ser utilizada no aquecimento do ar (H), no aquecimento do solo (G), na evapotranspiração (LE), nos processos de sínteses biológicas (fotossíntese, F), além do transporte lateral (advecção) de energia de/para outras regiões (FLE).

Os valores médios do saldo de radiação instantâneo (Rni) obtidos na área de estudo (Figura 3) variaram entre 641,9 W.m<sup>-2</sup> (1991) e 917,7 W.m<sup>-2</sup> (2008). Os valores mais elevados de Rni foram localizados nos corpos d'água, que apresentaram valores acima de 600 W.m<sup>-2</sup>. Valores semelhantes para os corpos hídricos foram obtidos por Gusmão et al. (2012) na Ilha do Bananal (TO) que encontraram, para espelhos d'água, valores superiores a 575 W.m<sup>-2</sup> e Tartari et al. (2015), no sudoeste da Amazônia, que obtiveram valores médio de 595,5 W.m<sup>-2</sup>.

Os valores do Rni na APA-Fazendinha (representativa de áreas de vegetação nativa) variaram entre 631 W.m<sup>-2</sup> (1991) e 910,7 W.m<sup>-2</sup> (2008). Silva, B. B. et al. (2015) encontraram valores de Rni entre 457,4 e 760,0 W.m<sup>-2</sup> (420 e 800 W.m<sup>-2</sup>) nas áreas com mais cobertura vegetal (plantações de cana e eucalipto e áreas com vegetação de savana arborizado) nos meses com menor (maior) contraste térmico e radiativa. Vale ressaltar que a vegetação na APA-Fazendinha é predominantemente arbórea e por isso obteve valores superiores ao encontrados por Silva et al. (2015). Florestas densas absorvem mais radiação que áreas desmatadas e pastagens, corroborando com os resultados deste trabalho que se assemelham aos Liberato (2011), Silva, L. C. et al. (2015) e Tartari et al. (2015) obtidos em superfícies de floresta, pastagem e outros sistemas agrícolas na Amazônia.

Na malha urbana da RMM os valores encontrados do Rni foram, em média, menores que os observados na região do entorno, variando entre 425 W.m<sup>-2</sup> (1991) e 630 W.m<sup>-2</sup> (2008). Valores semelhantes aos encontrados neste tipo de cobertura do solo foram observados por Pace et al. (2008), Rodrigues et al. (2009), Gusmão et al. (2012) e Oliveira et al. (2015). Gusmão et al. (2012) ainda

ressaltam que esses valores dependem de outros fatores, como estoque de umidade do solo, sazonalidade da radiação solar e interferência das chuvas locais.

Semelhante a Oliveira et al. (2015) neste trabalho o Rni apresentou menor magnitude em áreas urbanas ou solo exposto (Figuras 3) e, maior magnitude em áreas vegetadas e corpos hídricos. Cabe ressaltar que apesar de menor Rni na malha urbana da RMM, esta energia armazenada é usada principalmente nos fluxos de calor sensível, o que faz com que estas áreas apresentem maior temperatura em superfície.

Em 1986, a média de Rni mostrou-se maior para todas as coberturas de solo, o que pode ser explicado pela baixa umidade relativa do ar média, além da água ainda presente no solo em função da chuva ocorrida no período anterior no dia da captura da imagem. Assim, havendo uma maior disponibilidade de água no solo significa maior transpiração e aumento desta variável (Gomes et al., 2013), o que ocorre em função do uso de mais energia radiativa neste processo.

Em 1991 e 2008 o Rni apresentou uniformidade em toda a RMM. Na imagem do ano de 1991 os valores do Rni observados foram menores quando comparado à imagem de 2008, em que a classe de valores predominantes na cena ficou em torno de 500 a 525 W m<sup>-2</sup>. Já para a imagem de 2008 houve uma maior espacialização de Rni com valores superiores 575 W m<sup>-2</sup>. De modo geral, pode-se atribuir a diminuição do (Rn) encontrado na cena de 2010, a mudança da cobertura do solo e a sazonalidade da radiação solar no momento da passagem do satélite sobre a área em estudo.

Analisando a variabilidade temporal das cartas de saldo de radiação, percebe-se que as áreas que apresentaram Rn baixo (como na malha urbana) coincidem com áreas em que o albedo foi alto. Isto ocorre porque áreas com maior albedo proporcionam uma maior reflexão da radiação solar incidente, o que acarreta uma redução significativa no Rni, conforme explica Andrade et al. (2010).

Os valores do Rni estimados na RMM por meio das imagens do satélite LANDSAT estão de acordo com os encontrados na literatura (Andrade et al., 2010; Gusmão et al., 2012; Oliveira et al., 2015), em que os maiores valores foram encontrados nas superfícies naturais enquanto que os menores, em superfícies urbanas.

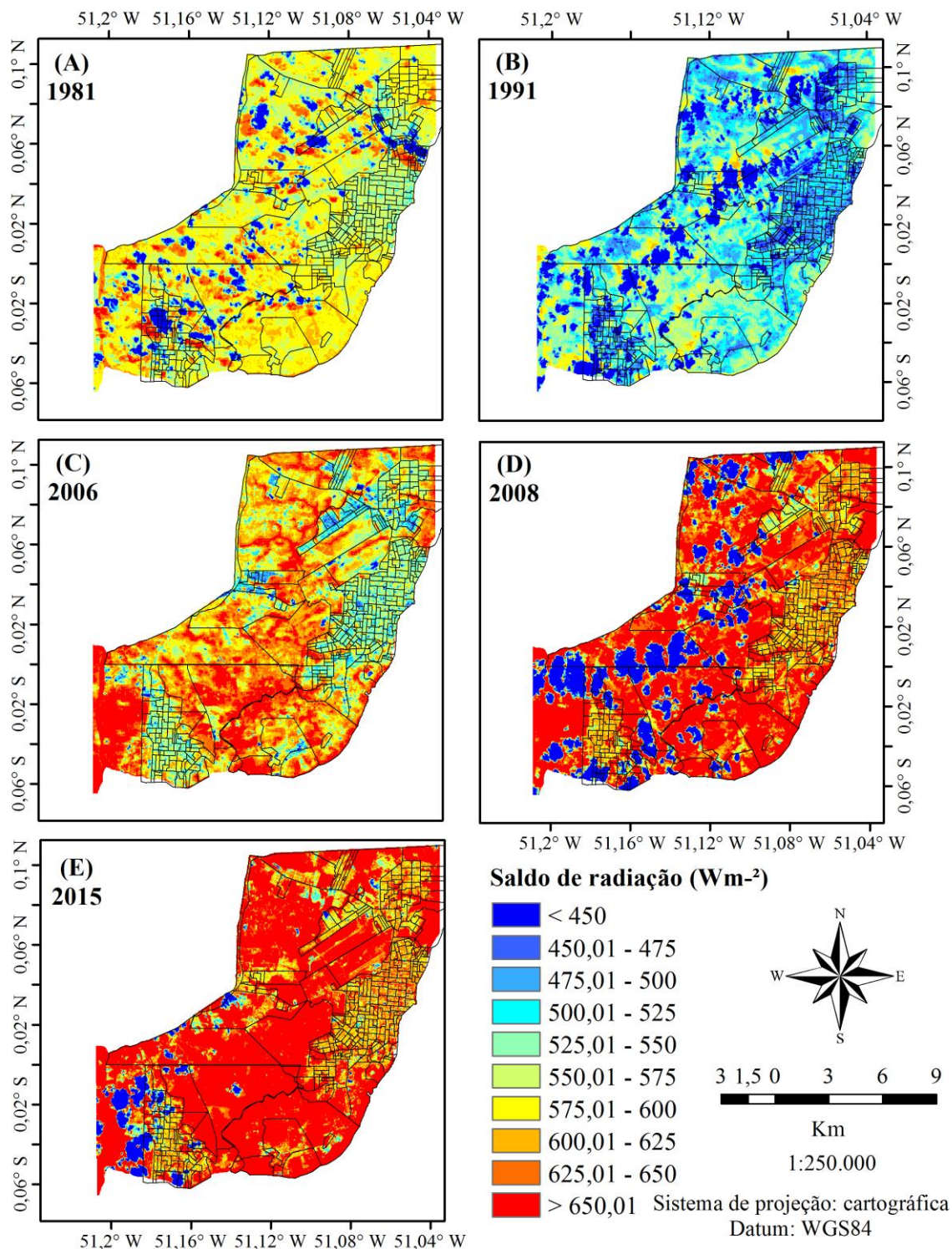


Figure 3 - Cartas de saldo de radiação na RMM.

#### 4. Conclusions

Verificou-se que a expansão da malha urbana da RMM se dá nas direções, SW e S, com destaque

para o distrito de Fazendinha, que se localiza entre o centro de Macapá e o centro da cidade de Santana.

O Rni apresentou menores valores em áreas urbanas ou solo exposto e, maiores valores em áreas vegetadas e corpos hídricos. Apesar de ser encontrados

valores baixos de Rni na malha urbana, faz-se necessário o estudo do balanço de energia para verificar com este Rni é fracionado nos fluxos turbulentos em superfície.

## Referências

- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2002. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land), Advanced training and users manual. Implementation, Idaho.
- Almeida A.S., Stone, T.A., Vieira, I.C.G., Davidson, E.A., 2010. Nonfrontier Deforestation in the Eastern Amazon. *Earth Interactions. Bulletin of the American Meteorological Society* 14, 1-15.
- Almeida A.S., Vieira, I.C.G., 2008. Dinâmica da Cobertura Vegetal e uso da terra no Município de São Francisco do Pará (Pará, Brasil) com uso da Técnica de Sensoriamento Remoto. *Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi* 3, 81-92.
- Andrade, R.G., Victoria, D.C., Nogueira, S.F., Massagli, G.O., Agnese, M.L., 2010. Estimativa dos fluxos de energia à superfície e da evapotranspiração real diária utilizando imagens do sensor MODIS/Aqua na Bacia do Rio Ji-Paraná, RO. *Embrapa Monitoramento por Satélite. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 13).*
- Bastiaanssen, W.G.M, Menenti, M, Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M., 1998. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) – Formulation. *Journal of Hydrology* 212-213, 198-212.
- Biudes, M.S., Vourlitis, G.L., Machado, N.G., Arruda, P.H.Z., Neves, G.A.R., Lobo, F.A., Neale, C.M.U., Nogueira, J.S., 2015. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology* 202, 112–124.
- Chander, G., Markham, B.L., Helder, D.L., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113, 893-903.
- Gomes, L.C.F., Santos, C.A.C., Almeida, H.A., 2013. Balanço de Energia à Superfície para a Cidade de Patos - PB usando Técnicas de Sensoriamento Remoto. *Revista Brasileira de Geografia Física* 6, 15-28.
- Gusmao, A.C.V.L., Silva, B.B., Montenegro, S.M.G.L., Galvêncio, J.D., 2012. Determinação do saldo radiativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16, 1107-1114.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Censo Demográfico 2010: resultados do universo. Disponível: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso: 27 maio 2013.
- IQBAL, M., 1983. *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, Toronto.
- Leite, E.F., Rosa, R., 2012. Análise do uso, ocupação e cobertura da terra da bacia hidrográfica do Rio Formiga, Tocantins. *Revista Eletrônica de Geografia* 4, 90-106.
- Liberato, A.M., 2011. Albedo à superfície a partir de imagens LANDSAT 5 – TM em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. *Revista de Geografia* 28, 110-119.
- Liu, W.T.H., 2006. Aplicações de Sensoriamento Remoto. UNIDERP, Campo Grande.
- Lombardo, M.A., 1985. Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo. Hucitec, São Paulo.
- Markham, B.L., Barker, J.L., 1987. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. *International Journal of Remote Sensing* 8, 517-523.
- Oliveira, L.M.M., Montenegro, S.M.G.L., Silva, B.B., Moura, A.E.S.S., 2015. Balanço de Radiação por Sensoriamento Remoto em Bacia Hidrográfica da Zona da Mata Nordestina. *Revista Brasileira de Meteorologia* 30, 16-28.
- ONU, 2012. *The State of Latin American and Caribbean Cities 2012: Towards a new urban transition*. ONU, Kenia.
- Pace, F.T., Silva, B.B., Silva, V.P.R., Silva, S.T.A., 2008. Mapeamento do Saldo de Radiação à Superfície com Imagens TM-Landsat 5 e Modelo de Elevação Digital. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 12, 385-392.
- Rodrigues, J.O., Andrade, E.M., Teixeira, A.S., Silva, B.B., 2009. Sazonalidade de variáveis biofísicas em região semiárida pelo emprego do sensoriamento remoto. *Engenharia Agrícola* 29, 452-465.
- Silva, A.F., Barbosa, A.P., Zimback, C.R.L., Landim, P.M.B., 2013. Geostatistics and remote sensing methods in the classification of images of areas cultivated with citrus. *Engenharia Agrícola* 33, 1245-1256.
- Silva, B.B., Braga, A.C., Braga, C.C., Oliveira, L.M.M., Montenegro, S.M.G.L., Barbosa Junior, B., 2016. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 20, 3–8.
- Silva, B.B., Lopes, G.M., Azevedo, P.V., 2005. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando

- imagens Landsat 5–TM. *Revista Brasileira de Meteorologia* 20, 243-252.
- Silva, B.B., Silva, V.P.R., Montenegro, S.M.G.L., Rocha, H.R., Oliveira, L.M.M., 2015. Determination of instantaneous and daily net radiation from TM - Landsat 5 data in a subtropical watershed. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 135, 42-49.
- Silva, L.C., Cunha, J.M., Machado, N.G., Campos, M.C.C, Biudes, M.S., 2015. Estimativa do balanço de radiação por sensoriamento remoto de diferentes usos de solo no sudoeste da Amazônia brasileira. *Sociedade e Natureza* 27, 341-356.
- Souza, D.O., 2012. Influência da ilha de calor urbana das cidades de Manaus e Belém sobre o microclima local. Tese (Doutorado em Meteorologia). São José dos Campos, INPE.
- Souza, J.D., Silva, B.B., Ceballos, J.C., 2008. Estimativa da radiação solar global à superfície usando um modelo estocástico: caso sem nuvens. *Revista Brasileira de Geofísica* 26, 31-44.
- Tartari, R., Machado, N.G., Anjos, M.R., Cunha, J.M., Muis, C.R., Biudes, M.S., Nogueira, J.S., 2015. Índices biofísicos estimados por imagens de satélite em paisagem heterogênea na bacia hidrográfica do rio Puruzinho, sudoeste da Amazônia. *Revista Ambiente e Água* 10, 943-953.
- USGS, Landsat Missions, 2014. Landsat 8 (L8) Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) Calibration Notices. Disponível: [http://landsat.usgs.gov/calibration\\_notices.php](http://landsat.usgs.gov/calibration_notices.php). Acesso: 25 set. 2015.
- USGS - United States Geological Survey 2015. Earth Resources Observation and Science Center (EROS): Global Visualization Viewer. Disponível: <http://glovis.usgs.gov/>. Acesso: 25 set. 2015.
- USGS - United States Geological Survey. Using Landsat 7 Data. Disponível: [http://landsat.usgs.gov/using\\_Landsat\\_7\\_data.php](http://landsat.usgs.gov/using_Landsat_7_data.php). Acesso: 25.set. 2015.