



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Determinação da evapotranspiração real diária em diferentes usos e ocupação do solo

Fabrcio Lopes de Macedo⁽¹⁾, Hélio Ricardo Silva⁽²⁾, Cristhy Willy da Silva Romero⁽²⁾, Ricardo Antonio Ferreira Rodrigues⁽²⁾, Artur Pantoja Marques⁽²⁾

⁽¹⁾Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Centro de Ciências Agrárias, Caixa Postal 04, CEP 58397-970 Areia, PB. Autor correspondente: e-mail: fabrciolmacedo@hotmail.com.

⁽²⁾Universidade Estadual Paulista – UNESP / FE Campus de Ilha Solteira, Av. Brasil, 56 – 15385-000 – Ilha Solteira - SP, Brasil, email - hrrsilva@agr.feis.unesp.br, cr_willy@hotmail.com, ricardo@agr.feis.unesp.br, artur@dec.feis.unesp.br.

Artigo recebido em 30/05/2016 e aceito em 27/08/2016

RESUMO

O emprego de técnicas de sensoriamento remoto tem adquirido grande importância em estudos relacionados ao monitoramento dos recursos naturais, propiciando suporte para um gerenciamento mais sustentável dos recursos hídricos. Baseado nessa premissa, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os diferentes componentes do balanço de energia e evapotranspiração, associados aos diferentes usos e ocupações do solo na microbacia Dois Córregos – Selvíria – MS, por meio do algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), utilizando imagens do satélite Landsat 5 – TM adquiridas ao final do período seco e chuvoso da bacia. Os fragmentos de mata apresentam, em relação às áreas com menos cobertura vegetal, menor Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), maior evapotranspiração e menor valor do Fluxo de Calor Sensível (H), o que promove redução substancial na temperatura da superfície. As áreas com maior exposição do solo além de apresentarem menor evapotranspiração, possuem elevado fluxo de calor sensível, o que impacta a temperatura do ar localmente. A técnica empregada foi capaz de detectar as grandes alterações que ocorrem na evapotranspiração como resultado dos diferentes padrões de cobertura vegetal, que são minimizados na estação chuvosa e realçados na estação seca. Os padrões evapotranspirativos das áreas com maior NDVI são compatíveis com os valores da Evapotranspiração Real Diária ETr registrados nos dias selecionados para a pesquisa.

Palavras-chave: Landsat 5, Sensoriamento Remoto, Fluxos de energia

Determination of real evapotranspiration everyday in different uses and land occupation

ABSTRACT

The use of remote sensing techniques have acquired great importance in studies related to monitoring of natural resources, providing support for a more sustainable management of water resources. Based on this premise, this study aimed to evaluate the different components of energy balance and evapotranspiration associated with different uses and land occupations in the watershed Dois Córregos - Selvíria - MS through the SEBAL algorithm (Surface Energy Balance Algorithm for Land) using satellite images Landsat 5 - TM acquired at the end of the dry and rainy seasons of the basin. Forest fragments have in relation to areas with less vegetation cover (lower Difference Vegetation Index Normalized (NDVI), greater evapotranspiration and lower the heat flow sensitive (H), which promotes substantial reduction in surface temperature. The areas with the highest exposure of the soil as well as their lower evapotranspiration, have high sensible heat flux, which impacts the air temperature locally. The technique was able to detect the great changes taking place in evapotranspiration as a result of the different coverage patterns vegetation, which are minimized in the rainy season and highlighted the dry season. The evapotranspirativos patterns of areas with higher NDVI are compatible with the values of the Evapotranspiration Real Daily ETr recorded in the days selected for research

Keywords: Landsat 5, Remote Sensing, Energy flows.

Introdução

A água doce tem se tornado, ao longo das últimas décadas, o mais precioso recurso natural e uma gestão eficaz e ambientalmente sustentável deste compreende um dos maiores desafios da humanidade. A crescente demanda por recursos

hídricos requer o conhecimento de onde, quando e como a água será utilizada. Assim, a quantificação da evapotranspiração (ET) é indispensável para o manejo hídrico sustentável de cultivos irrigados. A evapotranspiração é um dos principais fatores mediadores do clima, pois atua em diversos processos

físicos, interligando energia, clima e hidrologia (Bezerra et al., 2008; Santos et al., 2010).

O conhecimento da evapotranspiração é fundamental em projetos de irrigação, pois representa a quantidade de água que deve ser reposta ao solo para manter o crescimento e a produção em condições ideais (Pereira et al., 1997). A sua determinação é tipicamente modelada por meio de dados meteorológicos e algoritmos que descrevem a energia da superfície e as características da vegetação (Allen et al., 2007). Dentre as diferentes técnicas empregadas para a determinação da ET podem ser destacadas: o uso de lisímetros, balanço hídrico em volume de solo conhecido, balanço de energia segundo a Razão de Bowen (Todd et al., 2000; Wever et al., 2002; Silberstein et al., 2003; Azevedo et al., 2006; Silva et al., 2007), covariância de vórtices turbulentos, cintilometria (Hartogensis et al., 2003), quantificação do fluxo de seiva (Steppe et al., 2010) e mais recentemente tem sido possível determinar a ET em áreas heterogêneas e de grandes dimensões com o balanço de energia baseado no uso de imagens satélites (Bastiaanssen et al., 1998a, 2005; Allen et al., 2007; Irmak e Irmak, 2008).

Segundo Silva et al. (2005) e Silva e Bezerra (2006) graças ao desenvolvimento dos produtos de sensoriamento remoto, foi possível desenvolver técnicas para determinação dos balanço de radiação e energia na superfície com auxílio de imagens de satélite, possibilitando estimar a ET em escala regional (Bastiaanssen et al., 2005; Allen et al., 2007; Silva et al., 2012) e mesmo global (Mu et al., 2007), tornando-se uma ferramenta vantajosa para o manejo racional da irrigação em bacias hidrográficas.

No entanto, quando há presença marcante de nuvens sobre a região de interesse não é possível a determinação do balanço radiativo da superfície, o que impede que se obtenha a ET daquela região. Outra restrição da técnica diz respeito à resolução temporal, que no caso do Landsat 5 é de 16 dias, o que impossibilita, por exemplo, o manejo sistemático de irrigações. Estas desvantagens não são observadas nos métodos de aplicação em áreas homogêneas e de pequena dimensão, como o da razão de Bowen, lisimetria e mesmo o de covariância de vórtices turbulentos. Uma revisão atual sobre as vantagens e desvantagens de cada uma das técnicas mais empregadas em todo o mundo se encontra em Allen et al. (2007).

Com o intuito de simplificar o processo de aquisição de variáveis hidrológicas para grandes áreas, determinados algoritmos foram desenvolvidos nos últimos anos. Dentre eles o mais empregado na atualidade é o SEBAL - Surface Energy Balance Algorithm for Land (Bastiaanssen et al., 1998a; Bastiaanssen et al., 2005). O SEBAL tem sido

aplicado em diversas regiões do planeta, tendo como característica principal requerer número reduzido de dados meteorológicos de superfície necessários para a determinação do balanço de energia (Bastiaanssen et al., 2005; Silva et al., 2005; Silva e Bezerra, 2006; Teixeira et al., 2009; Silva et al., 2012).

O algoritmo SEBAL faz uso das radiâncias espectrais registradas em sensores (TM, ETM+, ASTER, AVHRR, MODIS) de satélites que proporcionam a determinação da temperatura da superfície, do albedo e de índices de vegetação. São requeridos, ainda, poucos dados meteorológicos de superfície, que incluem a velocidade do vento, temperatura do ar e radiação solar global. Com tais informações, são determinados os balanços de radiação e de energia, quando então se obtém o fluxo de calor latente como resíduo do balanço de energia (Bastiaanssen et al., 1998b, 2005; Silva et al., 2012).

As mudanças no uso e ocupação da terra em bacias hidrográficas podem provocar substanciais alterações no balanço de energia e, por conseguinte, afetar a evapotranspiração e até mesmo o clima localmente (Foster et al., 2007). Em algumas regiões do planeta a substituição de áreas de pastagem por cultivos agrícolas repercutem positivamente na evapotranspiração e no clima dessas áreas. Em outras regiões a substituição da vegetação nativa por cultivos agrícolas pode reduzir a evapotranspiração, com impactos diretos no clima, como aumento da temperatura do ar (Silva et al., 2011). Neste contexto, o presente trabalho objetivou o mapeamento da evapotranspiração e análise da mesma em diferentes tipos de uso da terra. Foram empregadas imagens TM - Landsat 5 e dados meteorológicos complementares.

Material e métodos

Localização da área de estudo

Foram selecionadas 4 áreas com uso e ocupação do solo diversificado, circunscrita pelas coordenadas Longitude 51°54'16,758"W, Latitude 20°29'26,398"S e Longitude 51°42'41,814"W, Latitude 20°20'9,723"S (Figura 1). Essa área de estudo localiza-se próximo da microbacia Dois Córregos, nas margens do Reservatório da Usina Hidrelétrica Engenheiro Souza Dias (Jupia), no município de Selvíria, estado de Mato Grosso do Sul.

O relevo da região é caracterizado como moderadamente plano. O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw - tropical úmido megatérmico, com chuvas no verão e seca no inverno. A temperatura média é de 23,5°C, com uma precipitação média anual de 1,250 mm. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, A moderado. A vegetação predominante na região é o Cerrado (gramíneo-

lenhosa, arbórea densa e arbórea aberta), com pequenas faixas de Mata Atlântica, que se alternam perpendicularmente às margens do Rio Paraná.

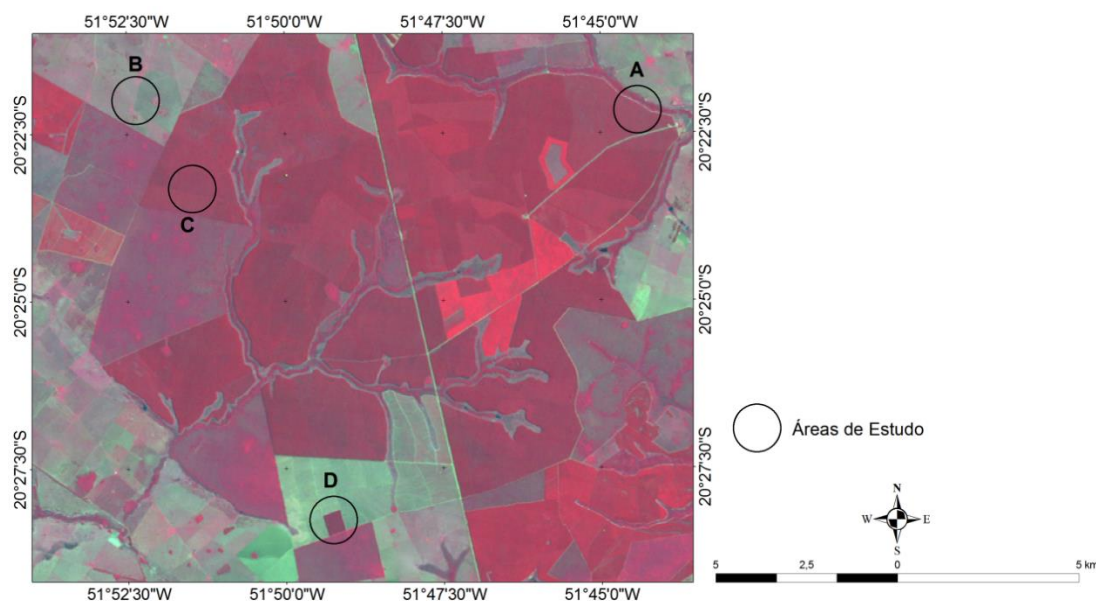


Figura 1. Composição 4R3G2B referentes às localizações e identificações das áreas de estudo.

Metodologia

Para a determinação da evapotranspiração diária (mm dia^{-1}), os componentes dos balanços de radiação e de energia foram obtidos a partir de imagens TM - Landsat 5 e alguns dados

complementares de superfície (Tabela 1), coletados na Estação Agrometeorológica de Ilha Solteira - SP, pertencente à Rede de Estações Agrometeorológicas do Noroeste Paulista.

Tabela 1. Data, Hora (local), ângulo de elevação do Sol (E em graus), quadrado do inverso da distância relativa Terra-Sol (dr , adimensional), cosseno do ângulo zenital do Sol ($\cos Z$, adimensional), temperatura do ar (T_a em $^{\circ}\text{C}$), umidade relativa (UR em %), pressão atmosférica (Pa em kPa), radiação solar global diária (R_s em W.m^{-2}), velocidade do vento a 3,0 m (u_{3m} em m.s^{-1}) nos dias 11/04/2009, 18/09/2009, 14/04/2010 e 21/09/2010 em Ilha Solteira – SP.

Data	Hora	E	dr	Cos Z	Ta	Pa	UR	Rs, 24h	U _{3m}
11/04/2009	09:15:23	47,04	0,9945	0,7294	24,9	97,4	62,8	267,4	0,5
18/09/2009	13:18:04	52,75	0,9906	0,7960	27,0	97,4	57,1	265,0	2,5
14/04/2010	13:19:10	46,67	0,9928	0,7310	24,2	97,7	58,1	266,1	0,8
21/09/2010	13:18:26	53,88	0,9945	0,8056	29,9	97,4	36,4	245,4	2,5

As imagens utilizadas no estudo foram adquiridas junto à Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), segundo órbita/ponto 223/74, referentes às datas 11/04/2009, 14/04/2010, 18/09/2009 e 21/09/2010, correspondendo ao final da época chuvosa e seca, respectivamente. Na determinação do saldo de radiação instantâneo à superfície foram utilizados

No SEBAL a evapotranspiração real diária (ET_r) é obtida a partir do fluxo de calor latente (LE), que é calculado como resíduo do balanço de energia

procedimentos empregados no SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998a, 2005; Allen et al., 2007; Silva et al., 2005; 2012), representando as diversas etapas de cômputo dos diferentes componentes do balanço de radiação. Essas datas foram escolhidas por representarem estações contrastantes e por estarem livres de nebulosidade, que poderia afetar substancialmente os resultados.

à superfície, qual seja (Bastiaanssen et al., 2005; Silva et al., 2012):

$$LE = Rn - G - H \quad (1)$$

em que,

Rn - saldo de radiação, (W.m⁻²);
 G - fluxo de calor no solo, (W.m⁻²), e
 H - fluxo de calor sensível, (W.m⁻²).

Determinou-se o Rn em cada pixel da área de estudo, segundo equação (Allen et al., 2007; Silva et al., 2012):

$$Rn = R_{s,inst} (1 - \alpha) + \varepsilon R_{ol,atm} - R_{ol,emi} \quad (2)$$

em que,

R_{s,ins} - radiação solar global instantânea, (W.m⁻²);
 α - albedo da superfície, (adimensional);
 R_{ol,atm} - radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície, (W.m⁻²);
 R_{ol,emi} - radiação de onda longa emitida pela superfície, (W.m⁻²), e
 ε_o - emissividade da superfície, (adimensional).

O albedo de cada pixel (30 m x 30 m) corrigido os efeitos atmosféricos foi calculado de acordo com modelo que tem sido amplamente utilizado (Bastiaanssen et al., 1998b, 2005; Allen et al., 2007; Silva et al., 2011):

$$\alpha = \left(\frac{\alpha_{toa} - a}{\tau_{sw}^2} \right) \quad (3)$$

em que,

α_{toa} - albedo sem correção atmosférica, que combina a reflectância de todas as seis bandas reflectivas do TM (Silva et al., 2011);

a - reflectância da atmosfera, considerada neste estudo igual a 0,03 (Bastiaanssen et al., 2005; Silva et al., 2011; Allen et al., 2007);

τ_{sw} - transmitância atmosférica, que depende da pressão atmosférica, Pa (kPa), do ângulo zenital solar (Z), do coeficiente de turbidez atmosférica (k_t), e da água –precipitável, W (mm), sendo obtida segundo (Allen et al., 2007):

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \exp \left[\frac{-0,00146 P_a}{K_r \cos Z} - 0,075 \left(\frac{W}{\cos Z} \right)^{0,4} \right] \quad (4)$$

e a água precipitável foi calculada segundo modelo proposto por Garrison & Adler (1990):

$$W = 0,14 e_a P_a + 2,1 \quad (5)$$

em que,

e_a - pressão parcial do vapor d'água, kPa.

A radiação solar global instantânea - R_{s,inst} (W m⁻²) para condições de céu claro foi obtida por meio da seguinte parametrização (Allen et al., 2007; Silva et al., 2011):

$$R_{s,inst} = S_0 \cos Z d_r \tau_{oc} \quad (6)$$

em que,

S₀ - constante solar, 1.367 W.m⁻²;

Z - ângulo zenital do Sol, e

τ_{oc} - transmitância atmosférica (Eq.4).

A radiação de onda longa, R_{ol,emi} (W m⁻²), emitida por cada pixel depende da temperatura da superfície, Ts (K), e de sua emissividade, e_o, tendo sido calculada pela equação de Stefan–Boltzmann:

$$R_{ol,emi} = \varepsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (7)$$

em que,

ε_o - emissividade de cada pixel;

σ - constante de Stefan-Boltzmann, (5,67x10⁻⁸ W.m⁻².K⁻⁴), e

Ts - temperatura da superfície (K), que depende da radiância espectral da banda termal do TM - L_{λ6} (W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹) e de sua emissividade (ε_{NB}), sendo obtida pela equação de Planck invertida (Markham & Barker, 1986):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{\varepsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda 6}} + 1 \right)} \quad (8)$$

em que,

K₁ (607.76 W m⁻² sr⁻¹ μm⁻¹) e K₂ (1260.56 K) são constantes de radiação específicas da banda termal do TM. As emissividades ε_{NB} e ε_o foram estimadas por meio de parametrizações desenvolvidas por Tasumi (2003):

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 IAF, \text{ válida para } IAF \leq 3 \quad (9)$$

$$\varepsilon_0 = 0,97 + 0,0033 IAF, \text{ válida para } IAF \geq 3 \quad (10)$$

em que,

IAF - Índice de área foliar, ($m^2 m^{-2}$); para os pixels com $IAF > 3$, considera-se que $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$. Para corpos d'água assumiu-se que $\epsilon_{NB} = 0,99$ e que $\epsilon_0 = 0,985$.

A radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície, $R_{ol,atm}$ (Wm^{-2}), foi também obtida segundo a equação da Stefan-Boltzmann (Bastiaanssen et al., 2005; Silva et al., 2011):

$$R_{ol,atm} = \epsilon_a \sigma T_a^4 \quad (11)$$

em que,

ϵ_a - emitância atmosférica (adimensional);

σ - constante de Stefan-Boltzmann, e

T_a - temperatura do ar (obtida na estação meteorológica de Ilha Solteira).

Para a determinação de ϵ_a utilizou-se a equação:

$$\epsilon_a = 0,625 \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{0,131} \quad (12)$$

em que,

e_a - pressão parcial do vapor d'água atmosférico, (Pa), e

T_a - temperatura do ar, (K).

O fluxo de calor no solo (G) foi obtido por meio de modelo proposto por Bastiaanssen (2000):

$$G = [T_{sup} (0,0038 + 0,0074\alpha)(1 - 0,98NDVI^4)] R_n \quad (13)$$

em que,

T_{sup} - temperatura da superfície, ($^{\circ}C$);

α - albedo, (adimensional);

NDVI - Índice de vegetação da diferença normalizada, (adimensional), e

R_n - saldo de radiação em cada pixel da imagem, ($W m^{-2}$).

Para efeito de cálculo, assumiu-se $G = 0,3R_n$ em corpos de água ($NDVI < 0$) (Silva et al., 2005; Bezerra et al., 2008). Os valores do fluxo de calor

sensível (H) foram estimados com base na velocidade do vento e na diferença da temperatura do ar (dT) entre dois níveis próximos da superfície ($Z_1 = 0,1 m$ e $Z_2 = 2,0 m$), segundo o SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998b; Allen et al., 2007):

$$H = \rho c_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad (14)$$

em que,

ρ - densidade do ar atmosférico, ($kg m^{-3}$);

c_p - calor específico do ar à pressão constante, ($J kg^{-1} K^{-1}$), e

r_{ah} - resistência aerodinâmica ao transporte de calor sensível, ($s m^{-1}$).

Uma importante hipótese do SEBAL consiste em considerar linear a diferença de temperatura (dT) e a temperatura da superfície, ou seja: $dT = a + b T_{sup}$, em que as constantes de calibração a e b requerem, para a sua determinação, a identificação de dois pixels de referência (pixels âncoras) que representam condições extremas de temperatura e umidade, denominados pixels quente e frio. No pixel frio se assumiu ser $H = 0$ (Bastiaanssen et al., 1998b). Já o pixel quente foi escolhido em área de solo com grande exposição, onde se assumiu ser o $LE = 0$, ou seja, $H = R_n - G$, com o que foi possível obter os valores das constantes de calibração (Bastiaanssen et al., 1998b; Bezerra et al., 2008; Silva et al., 2012). Tais valores iniciais de H servem apenas como parâmetros de entrada de processo iterativo em que é identificada a condição de estabilidade de cada pixel mediante teoria da similaridade de Monin-Obukhov e valor do parâmetro L (m):

$$L = - \frac{\rho c_p u_*^3 T_s}{kgH} \quad (15)$$

em que,

u_* - velocidade de fricção, ($m s^{-1}$);

T_{sup} - temperatura da superfície, (K);

$k = 0,41$ - constante de von Karman, (adimensional);

g - módulo do campo gravitacional terrestre, ($m s^{-2}$), e

H - fluxo de calor sensível, ($W m^{-2}$), obtido inicialmente considerando a atmosfera em condição de estabilidade neutra.

Dependendo da condição de estabilidade da atmosfera, são aplicadas correções aos novos valores de u_* e r_{ah} , com o que são obtidos novos valores das

constantes de calibração de dT. O processo continua até que se alcance a estabilidade do processo iterativo quando então se obtém um mapa temático de H e, na sequência, a densidade do fluxo de calor latente ($W m^{-2}$), em cada pixel da área de estudo (Silva e Bezerra, 2006; Bezerra et al., 2008; Silva et al., 2012).

Os valores da evapotranspiração real diária (ETc) foram obtidos a partir de extrapolação do valor instantâneo do LE (Equação 1) através da expressão (Bezerra et al., 2008; Silva et al., 2012):

$$ET = 0,035 \left(\frac{LE}{Rn - G} \right) \left[(1 - \alpha) R_{s,24h} - 123 \tau_{oc,24h} \right] \quad (16)$$

em que,

$R_{s,24h}$ - radiação solar global diária, ($W m^{-2}$);

$\tau_{oc,24h}$ - transmissividade atmosférica média diária, (adimensional), obtida como base na radiação solar global diária observada na estação meteorológica e a radiação solar diária do topo da atmosfera terrestre nos dias estudados; e 0,035 é o fator de conversão de $W m^{-2}$ para $mm dia^{-1}$.

Os índices de vegetação usados na pesquisa são apresentados a seguir. O primeiro deles foi o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) que é obtido por (Tucker, 1979):

$$NDVI = \left(\frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \right) \quad (17)$$

em que,

ρ_3 - reflectância da banda 3 do TM – Landsat 5,

ρ_4 – reflectância da banda 4 do TM – Landsat 5.

Já o SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) foi determinado pela expressão (Huete, 1988):

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_4 - \rho_3)}{(L + \rho_4 + \rho_3)} \quad (18)$$

em que, $L = 0,1$ é um parâmetro que depende do tipo de solo da área de estudo. O outro índice utilizado foi o IAF - Índice de Área Foliar, ($m^2 m^{-2}$) que é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação (Allen et al., 2007):

$$IAF = \frac{-Ln \left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59} \right)}{0,91} \quad (19)$$

Resultados e discussão

Realizado o estudo de uso e ocupação das áreas selecionadas, foi possível verificar a existência de plantios de eucalipto em pleno desenvolvimento nas imagens de 11/04/2009 e de 14/04/2010 (final da estação chuvosa) nos pontos A, C e D e de pastagem em pleno desenvolvimento vegetativo no ponto B. Já na imagem de 18/09/2009, ao redor da área D foi possível verificar que o eucalipto tinha sido colhido, fato semelhante ocorreu na imagem de 21/09/2010 nos pontos A e C. Na área B nesses dois períodos (final da estação seca) verificou-se a presença de pastos na fenofase de maturação (pasto seco), com uma maior intensidade na imagem de 21/09/2010.

Analisando anualmente o NDVI nos quatro períodos selecionados, verificou-se que na área de estudo B foram obtidos os valores mais baixos de NDVI em comparação as outras áreas selecionadas. Isso pode ter sido ocasionado possivelmente pelo manejo inadequado da pastagem presente nessa área.

O NDVI regulariza a razão simples para o intervalo de -1 a +1, em que, áreas com intensa vegetação aproximam-se dos patamares superiores e áreas não vegetadas, do limite inferior (Rosendo, 2005; Ponzoni & Shimabukuro, 2009).

Tabela 2. Valores médios de NDVI obtidos para as áreas selecionadas.

	Área A	Área B	Área C	Área D
NDVI – 11/04/2009	0,712	0,535	0,783	0,727
NDVI – 18/09/2009	0,651	0,326	0,639	0,596
NDVI – 14/04/2010	0,683	0,579	0,761	0,743
NDVI – 21/09/2010	0,215	0,203	0,207	0,412

Considerando os dados da Tabela 2 e a Figura 2, ficou evidente que nos finais das épocas chuvosas, houve uma predominância de valores elevados de NDVI. Os resultados para o mês de abril nos dois

anos avaliados demonstraram que a maior parte da vegetação remanescente, com os mais elevados NDVI, estava localizada ao longo das margens dos rios e em áreas com o plantio de eucalipto.

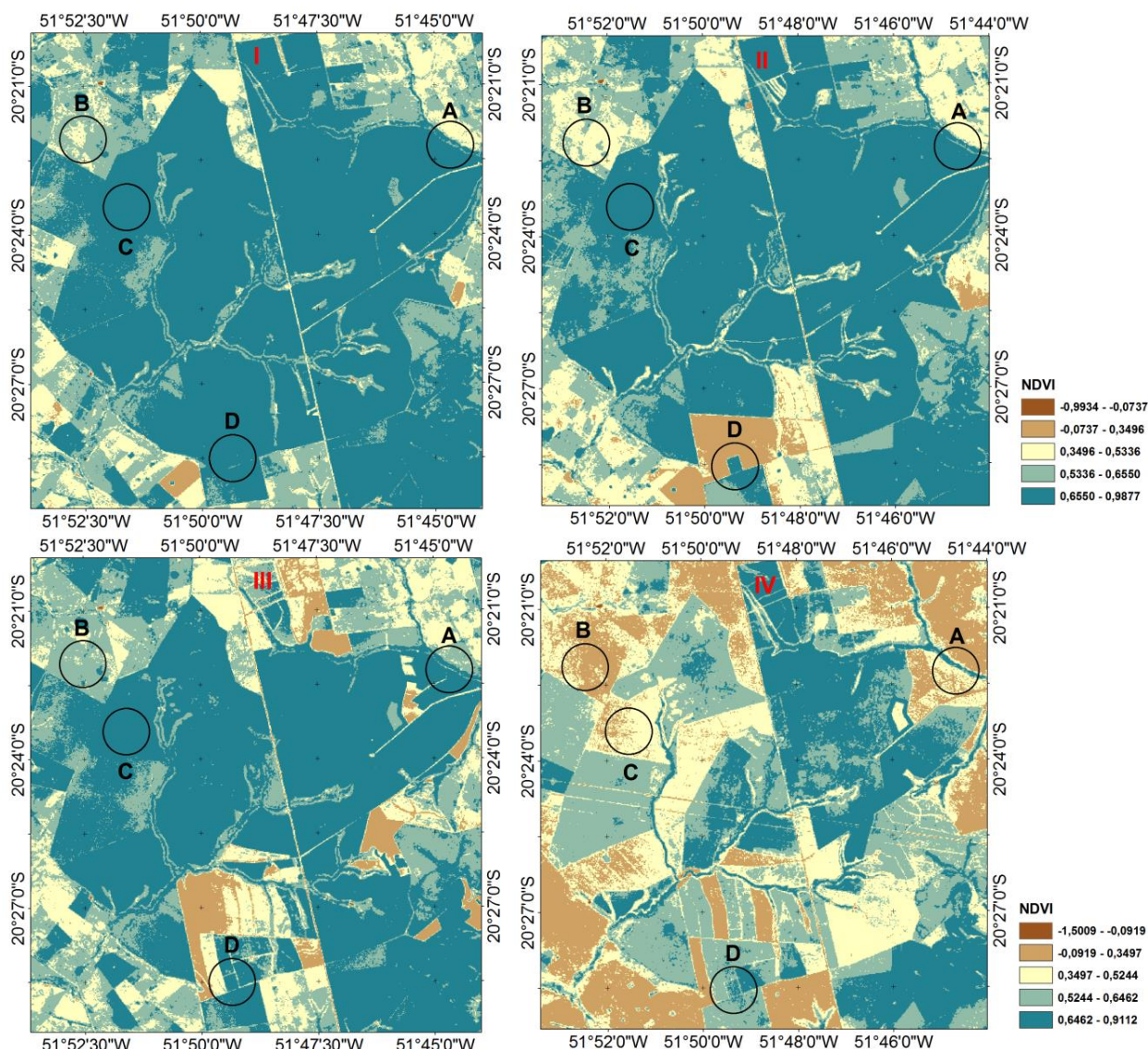


Figura 2. Mapas comparativos para o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para 11/04/2009 (I), 18/09/2009 (II), 14/04/2010 (III) e 21/09/2010 (IV).

Analisando os resultados do Saldo de Radiação (R_n) para as quatro datas, foi possível concluir que nas áreas com tons de azul (Tabela 3 e Figura 3) os valores médios mais baixos de R_n foram obtidos na área B em todos os períodos analisados. Avaliando os dados referentes ao final da época seca na imagem de 18/09/2009 foi possível verificar que as áreas A, C e D apresentaram valores mais baixos de R_n em comparação com a imagem 11/04/2009 (período chuvoso) porém com resultados superiores à

imagem de 21/09/2010. Esses fatos podem ser explicados, visto que, os menores valores foram obtidos nas áreas caracterizadas pela presença de pastagens na fase final do ciclo denominado maturação (Área B) e em zonas onde o eucalipto havia sido colhido (A, C e D). Esta situação pode ser verificada especialmente na imagem de 21/09/2010. Os resultados obtidos coincidem com os encontrados por Bezerra (2006).

Tabela 3. Valores médios do Saldo de Radiação (R_n , $W m^{-2}$) obtidos para as áreas selecionadas.

	Área A	Área B	Área C	Área D
RN – 11/04/2009	521,43	447,41	522,68	548,26
RN – 18/09/2009	615,64	546,87	621,48	600,84
RN – 14/04/2010	569,73	552,96	593,63	603,82
RN – 21/09/2010	483,90	470,72	479,08	599,78

Já as áreas com tonalidades vermelhas representaram valores elevados de R_n representando a vegetação de maior densidade, que corresponderam as áreas de eucalipto e alguns remanescentes

florestais localizados juntamente com os corpos hídricos, estes resultados concordam com os valores determinados por Santos et al. (2010) e Gusmão et al. (2012).

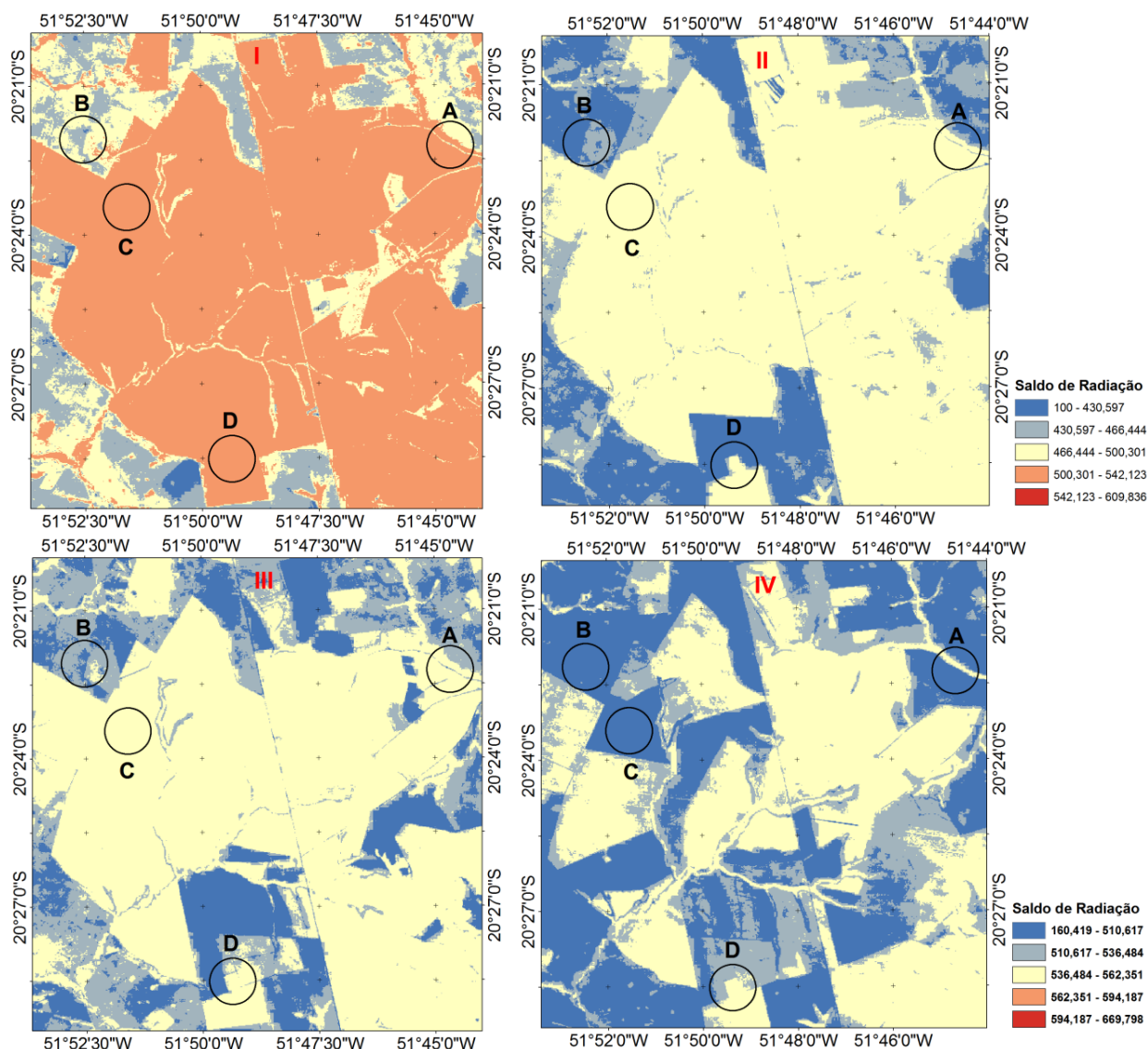


Figura 3. Mapas comparativos para o Saldo de Radiação (R_n) para 11/04/2009 (I), 18/09/2009 (II), 14/04/2010 (III) e 21/09/2010 (IV).

Com relação aos resultados para o Fluxo de Calor no Solo (G) (Tabela 4 e Figura 4) ficou evidente que, a presença de vegetação (tonalidade azul escuro) localizadas nas áreas de estudo A, C e D, tanto para o

final do período chuvoso quanto para o final do período seco apresentaram os menores valores, semelhante ao obtido por Oliveira e Galvêncio (2008). Estes autores concluíram que, o aumento da

densidade de cobertura vegetal promove a diminuição dos valores do fluxo de calor no solo. Já as classes nas demais cores, estavam localizadas em zonas ocupadas por vegetação antrópica com baixa atividade

fotossintética, por exemplo, as pastagens mal manejadas na área B no ano de 2009 e nas áreas A e C na imagem de 21/09/2010, talhões de eucaliptos colhidos.

Tabela 4. Valores médios do Fluxo de Calor no Solo (G em W m⁻²) obtidos para as áreas selecionadas.

	Área A	Área B	Área C	Área D
G – 11/04/2009	51,48	63,84	38,26	43,57
G – 18/09/2009	66,75	87,97	66,72	72,07
G – 14/04/2010	38,26	58,21	34,50	45,79
G – 21/09/2010	86,02	87,15	90,42	75,27

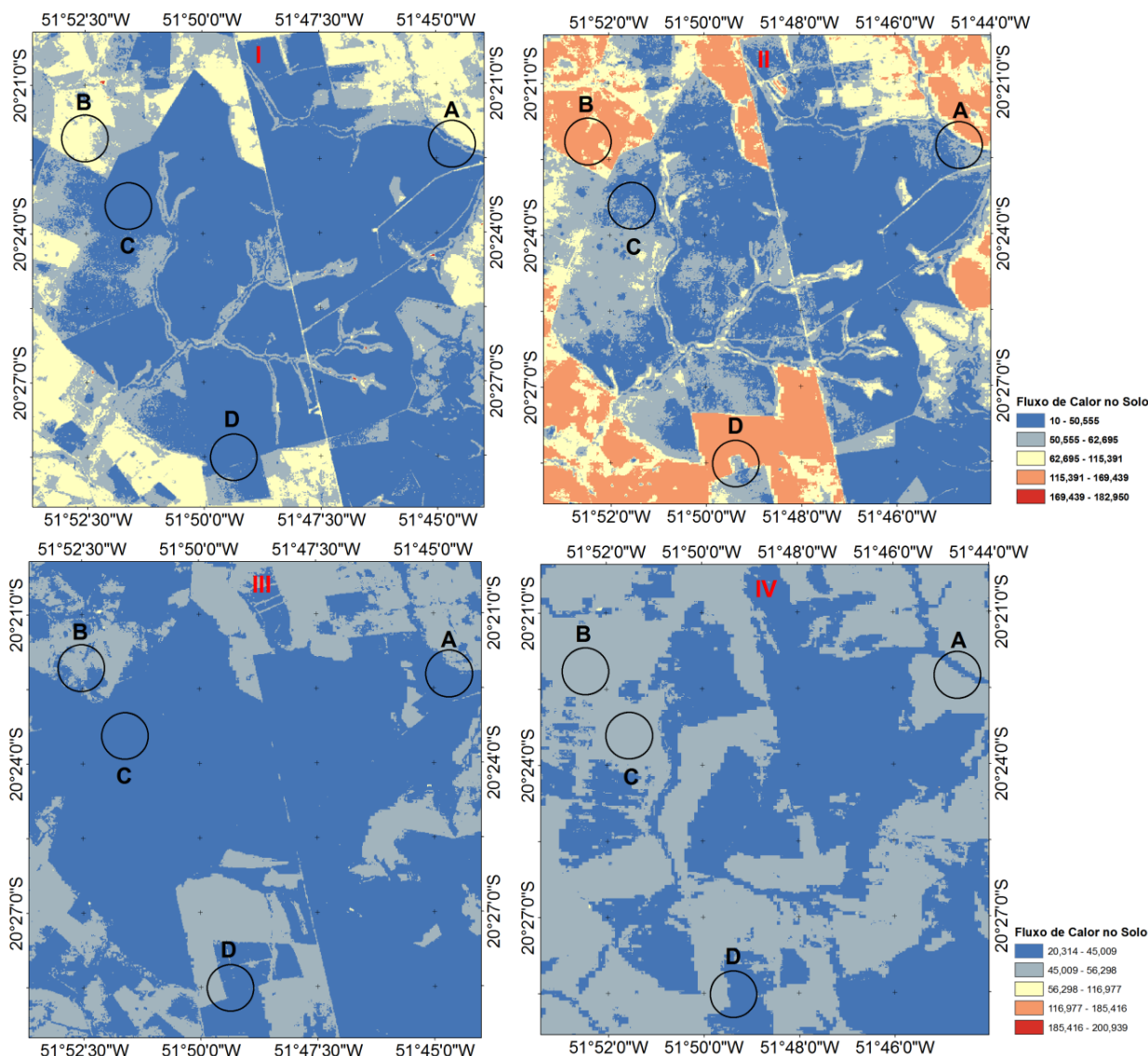


Figura 4. Mapas comparativos para o Fluxo de Calor no Solo (G em W m⁻²) para 11/04/2009 (I), 18/09/2009 (II), 14/04/2010 (III) e 21/09/2010 (IV).

Os resultados referentes ao Fluxo de Calor Sensível (H) demonstraram que os maiores valores obtidos foram encontrados em áreas que apresentavam uma baixa cobertura vegetal (Figura 5 e Tabela 5). Tanto nas imagens de 2009 como de 2010 no período seco, verificou-se que os maiores valores

de H foram determinados de maneira geral na área B independentemente do período do ano quando em comparação com as outras áreas de estudo, porém na imagem de 21/09/2010 a área C foi a que apresentou os maiores valores, possivelmente devido à colheita do eucalipto. Já os baixos valores de H, foram obtidos

em áreas com a presença da cultura, no entorno de córregos, matas ciliares, fragmentos florestais e culturas agrícolas bem desenvolvidas, semelhante ao determinado por Arraes et al. (2012).

Tabela 5. Valores médios do Fluxo de Calor Sensível (H em $W m^{-2}$) obtidos para as áreas selecionadas.

	Área A	Área B	Área C	Área D
H – 11/04/2009	15,11	72,48	9,51	8,47
H – 18/09/2009	100,89	253,26	101,32	65,34
H – 14/04/2010	17,56	69,98	8,66	7,56
H – 21/09/2010	241,08	215,43	260,18	123,08

Segundo Arraes et al. (2012) os menores valores para H nas áreas com presença vegetal em relação as áreas antropizadas, demonstram a real importância da vegetação no controle da temperatura do ar.

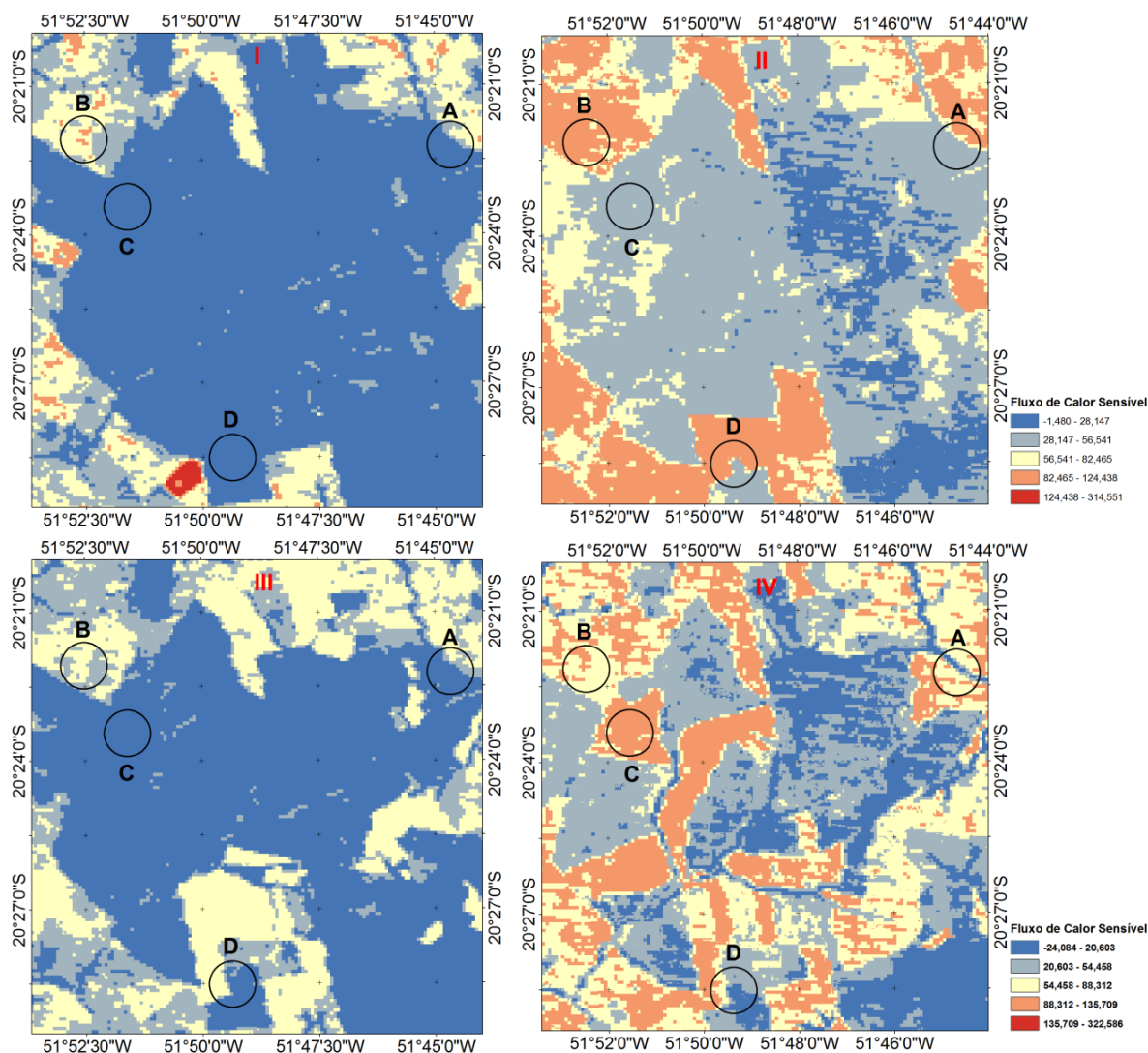


Figura 5. Mapas comparativos para o Fluxo de Calor Sensível (H em $W m^{-2}$) para 11/04/2009 (I), 18/09/2009 (II), 14/04/2010 (III) e 21/09/2010 (IV).

A Evapotranspiração Real Diária (ET_r) determinada para os quatro períodos avaliados (Figura 6 e Tabela 6) demonstram que os maiores valores foram obtidos para o final do períodos chuvosos. De maneira geral foi possível observar que as áreas com maior ET_r foram indicadas com superfícies que corresponderam às áreas delineadas pela presença da cultura de eucalipto, canais de drenagem, matas ciliares, fragmentos florestais e culturas agrícolas bem desenvolvidas. Para as áreas que apresentaram os menores valores, as mesmas eram ocupadas por atividades antrópicas de baixa

densidade vegetal como os encontrados na área B. Os resultados obtidos para a ETr, estão de acordo aos encontrados por Bezerra et al. (2008), Santos et al. (2010).

Tabela 6. Valores médios da Evapotranspiração Real Diária (ETr, mm dia⁻¹) obtidos para as áreas selecionadas.

	Área A	Área B	Área C	Área D
Etr – 11/04/2009	4,81	3,71	5,19	4,95
Etr – 18/09/2009	4,43	1,88	4,50	4,79
Etr – 14/04/2010	5,19	4,60	5,60	5,76
Etr – 21/09/2010	1,81	1,69	1,61	3,60

Com relação aos resultados obtidos para 21/09/2010, as alterações de campo promovidas por atividades antrópicas, favoreceram um aumento das áreas com baixos valores de ETr em quase todas as áreas selecionadas com exceção da área D. Os

resultados finais da comparação entre épocas avaliadas, não foram mais acentuados, devido a ocorrência de precipitações que antecederam à obtenção das imagens pelo Landsat 5 nos meses de abril e de setembro de 2009.

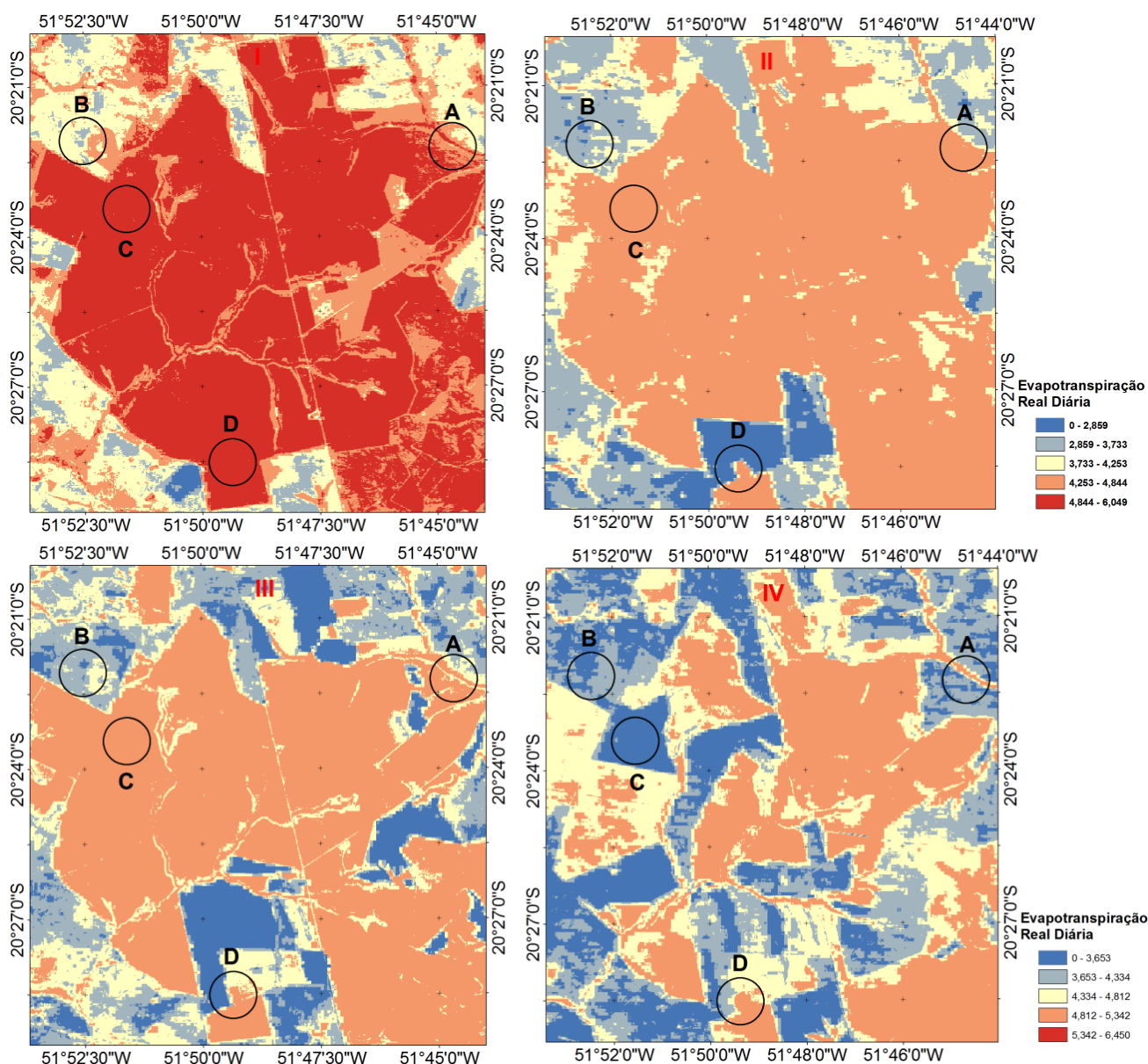


Figura 6. Mapas comparativos para a Evapotranspiração Real Diária (ETr) para 11/04/2009 (I), 18/09/2009 (II), 14/04/2010 (III) e 21/09/2010 (IV).

Conclusões

Os menores valores de evapotranspiração real diária foram obtidos em áreas de vegetação com baixo índice de área foliar e/ou solos expostos. O algoritmo SEBAL possibilitou identificar os diferentes padrões exibidos pelos diferentes usos e ocupações e como os mesmos afetam a evapotranspiração na escala da bacia. No entanto, se

faz necessário que sejam empreendidas campanhas experimentais para calibração e validação dos resultados da evapotranspiração, com emprego de um maior número de imagens. Nos fragmentos florestais ficou evidenciado que o maior valor da evapotranspiração favoreceu a diminuição no fluxo de calor sensível e consequente diminuição da temperatura.

Referências

- Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* [Online] 133. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380)). Acesso 20 jun. 2015.
- Arraes, F.D.D., Andrade, E.M., Silva, B.B., 2012. Dinâmica do balanço de energia sobre o Açude Orós e Suas adjacências. *Revista Caatinga, Mossoró* [Online] 25. Disponível: <http://periodicos.ufersa.edu.br/revistas/index.php/sistema/article/view/2024>. Acesso: 10 jun. 2015.
- Azevedo, P.V., Sousa, I.F., Silva, B.B., Silva, V.P.R., 2006. Water-use efficiency of dwarf-green coconut (*Cocos nucifera* L.) orchards in northeast Brazil. *Agricultural Water Management* [Online] 84. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.001> Acesso: 10 jun. 2015.
- Bastiaanssen, W.G.M., Meneti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A. 1998a. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *Journal of Hydrology* [Online] 212-213. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4). Acesso: 11 mai. 2015.
- Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y.; Moreno, J.F., Roerink, G.J., VAN DER WAL, T. 1998b. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. *Journal of Hydrology* [Online] 212-213. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6) Acesso: 11 mai. 2015.
- Bastiaanssen, W.G.M., 2000. SEBAL – Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology* [Online] 229. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4). Acesso: 10 mai. 2015.
- Bastiaanssen, W.G.M., Noordman, E.J.M., Pelgrum, H., Davids, G. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage* [Online] 131. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(85\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85)). Acesso: 5 mai. 2015.
- Bezerra, B.G., 2006. Balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri Cearense através do algoritmo SEBAL. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Campina Grande, Universidade Federal de Campina Grande.
- Bezerra, B.G., Silva, B.B., Ferreira, N.J., 2008. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. *Revista Brasileira de Meteorologia* [Online] 23. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862008000300005>. Acesso: 10 mai. 2015.
- Cunha, J.E.B.L., Rufino, I.A.A., Valente, F., Silva, B.B., Paço, T.A., 2011. Estimativa da evapotranspiração através de sensoriamento remoto. In: Galvão, C. O., J. A. Cirilo, J. J. S. P. Cabral e M. G. A. Medeiros (Org.), Recursos Hídricos para a convivência com o semiárido: Abordagens por pesquisadores no Brasil, Portugal, Cabo Verde, Estados Unidos e Argentina. 1.ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1.
- Foster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R. A., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., Van Dorland R., 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing, *Climate Change: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK/New York USA.
- Garrison, J.D., Adler, G.P. 1990. Estimation of precipitable water over the United State for application to the division of solar radiation into its direct and difuse coponents. *Solar Energy* [Online] 44. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90151-2](http://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(90)90151-2). Acesso: 10 jun. 2015.
- Gusmão, 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* [Online] 16. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012001000011>. Acesso: 10 mai. 2015.
- Hartogensis, O.K., Watts, C.J., Rodriguez, J.C., De Bruin, H.A.R., 2003. Derivation of an effective height for scintillometers: La Poza experiment in northwest Mexico. *American meteorological*

- society [Online] 4. Disponível: [http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1525-7541\(2003\)004%3C0915%3ADOAEHF%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1525-7541(2003)004%3C0915%3ADOAEHF%3E2.0.CO%3B2). Acesso: 20 mai. 2015.
- Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing Environment* [Online] 25. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X). Acesso: 12 mai. 2015.
- Irmak, A., Irmak, S., 2008. Reference and crop evapotranspiration in south central Nebraska: II. Measurement and estimation of actual evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* [Online] 134. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2008\)134:6\(700\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:6(700)). Acesso: 11 mai. 2015.
- Markham, B.L., Barker, J.L., 1986. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures: EOSAT Landsat Technical Notes, 1.
- Mu, Q., Heinsch, F.A., Zhao, M., Running, S. W., 2007. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorologydata. *Remote Sensing of Environment* [Online] 111. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.015>. Acesso: 12 mai. 2015.
- Oliveira, T.H., Galvêncio, J.D., 2008. Caracterização ambiental da bacia hidrográfica do Rio Moxotó – PE usando sensoriamento remoto termal. *Revista Brasileira de Geografia Física* [Online] 1. Disponível: <http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/viewArticle/43>. Acesso: 10 jun. 2015.
- Ponzoni, F.J.; Shimabukuro, Y.E., 2009. *Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação*. São José dos Campos: Parêntese.
- Rosendo, J. dos S., 2005. Índices de Vegetação e Monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na Bacia do rio Araguari -MG - utilizando dados do sensor Modis. *Dissertação (Mestrado em Geografia e Gestão do Território) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia*.
- Pereira, A.R., Villa Nova, N.A., Sedyama, G.C., 1997. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ.
- Santos, T.V., Fontana, D.C., Alves, R.C. M., 2010. Avaliação de fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* [Online] 45. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010000500008>. Acesso: 10 mai. 2015.
- Silberstein, R.P., Sivapalan, M., Viney, N.R., Held, A., Hatton, T.J., 2003. Modelling the energy balance of a natural jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest. *Agricultural and Forest Meteorology* [Online] 115. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00155-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00155-7). Acesso: 08 jun. 2015.
- 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* [Online] 20. Disponível: http://www.dca.ufcg.edu.br/DCA_download/ISR/UFPE/56-2004_BBBarbosa-aceito.pdf. Acesso: 05 abr. 2015.
- Silva, B.B., Bezerra, M.V.C., 2006. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* [Online] 14. Disponível: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v23n3/v23n3a05.pdf>. Acesso: 05 abr. 2015.
- Silva, V.P.R., Azevedo, P.V.de, Silva, B.B., 2007. Surface Energy Fluxes and Evapotranspiration of a Mango Orchard Grown in a Semiarid Environment. *Agronomy Journal* [Online] 99. Disponível: <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2006.0232>. Acesso: 07 mai. 2015.
- Silva, B.B., Braga, A.C., Braga, C.C., Oliveira, L.M.M., Galvêncio, J.D., Montenegro, S.M.L., 2012. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do Semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* [Online] 47. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900006>. Acesso: 07 mai. 2015.
- Steppe, K., Pauw, D.J.W., Doody, T.M., Teskey, R.O., 2010. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods. *Agricultural and Forest Meteorology* [Online] 150. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.04.004>. Acesso: 25 jun. 2015.
- Tasumi, M., 2003. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. PhD Thesis – Idaho, University of Idaho.
- Teixeira, A.H.C., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M.D., Bos, M.G., 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation. *Agricultural and Forest Meteorology* [Online] 149. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.09.016>. Acesso: 30 jun. 2015.
- Todd, R.W., Evett, S.R., Howell, T.A., 2000. The Bowen ratio–energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa

- evaluated in a semi-arid, advective environment., 2000. *Agricultural and Forest Meteorology* [Online] 103. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00139-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00139-8). Acesso: 30 jun. 2015.
- Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* [Online] 8. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0). Acesso: 17 mai. 2015.
- Wever, L.A., Flanagan, L.B., Carlson, P.J., 2002. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology* [Online] 112. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00041-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00041-2). Acesso: 30 jun. 2015.