

Mapeamento de parâmetros biofísicos e da evapotranspiração no Pantanal usando técnicas de sensoriamento remoto

Ricardo Guimarães Andrade¹
Gilberto Chohaku Sedyama²
Mateus Batistella¹
Daniel de Castro Victoria¹
Adriano Rolim da Paz¹
Evaldo de Paiva Lima²
Sandra Furlan Nogueira¹

¹ Embrapa Monitoramento por Satélite - CNPM
Av. Soldado Passarinho, 303
13070-115 - Campinas - SP, Brasil
{ricardo, mb, daniel, adriano, sandra}@cnpm.embrapa.br

² Universidade Federal de Viçosa – UFV/DEA
Av. P.H. Rolfs, s/n - Campus Universitário
36570-000 - Viçosa - MG, Brasil
g.sedyama@ufv.br
evaldolima@hotmail.com

Resumo. Nos últimos anos, técnicas de sensoriamento remoto têm sido aplicadas extensivamente no monitoramento e mapeamento de diversos fenômenos meteorológicos e ambientais. Informações de sensores remotos têm alimentado diversos modelos e algoritmos para obtenção de parâmetros da superfície da terra. O SEBAL é um algoritmo que tem como vantagem a obtenção de parâmetros de superfície da terra com poucos dados observacionais de forma efetiva e econômica. Este trabalho objetivou mapear parâmetros biofísicos e a evapotranspiração real diária no Pantanal por meio do algoritmo SEBAL e imagem Modis/Terra. Os resultados preliminares aqui obtidos sugerem que, numa escala regional, o algoritmo SEBAL pode ser considerado como método de potencial aplicação na região do Pantanal em estudos diversos de processos biofísicos do sistema solo-planta-atmosfera com quantidade limitada de informações de superfície.

Palavras-chave: fluxos de energia, evapotranspiração, satélite, áreas úmidas, Pantanal, SEBAL.

Abstract. In recent years, remote sensing techniques have been applied extensively in monitoring and mapping of various meteorological and environmental phenomena. Remote sensing information has been used by several models and algorithms for obtaining parameters of the earth's surface. The SEBAL is an algorithm that has the advantage of obtaining parameters of the earth's surface with few observational data in an effective and economical way. This study aimed to map biophysical parameters and the actual daily evapotranspiration in the Pantanal by means of the SEBAL algorithm and Modis/Terra image. Preliminary results suggest that, on a regional scale, SEBAL algorithm can be considered as a method of potential application in the Pantanal region in several studies of biophysical processes of the soil-plant-atmosphere with limited amount of surface information.

Key-words: energy flux, evapotranspiration, satellite, wetlands, Pantanal, SEBAL.

1. Introdução

Nos últimos anos, devido a escassez de informações meteorológicas de algumas regiões e a dificuldade de se obter de forma representativa em escala regional alguns parâmetros de superfície, as técnicas de sensoriamento remoto tem sido imprescindíveis na detecção de informações em áreas extensas de forma rápida e efetiva. Compaoré et al. (2008), por exemplo, citam que na paisagem heterogênea do planalto central da Espanha, 13 medições de evapotranspiração (ET) em uma área relativamente pequena (5000 km²) não foi suficiente para prever com precisão a taxa de ET média da área. Assim, além das medições aproximadas da ET por meio da covariância de vórtices turbulentos, razão de Bowen e lisímetros de pesagem ser métodos caros, também consome muito tempo para aplicação contínua para que se tenha em escala regional uma densidade de pontos de medições espacialmente suficiente.

Os modelos hidrológicos e técnicas de sensoriamento remoto são ferramentas avançadas que permitem boa estimativa da ET e dos processos hidrológicos relacionados em uma escala regional (Bastiaanssen, 2000). A vantagem dos modelos hidrológicos é que o impacto de transferência da água entre os competitivos setores podem ser simulados e estudados por meio da indução dos seus efeitos em cenários da hidrologia regional. Entretanto, destaca-se como desvantagem a exigência de extensos dados de campo para realizar as simulações numa possível escala regional. A principal vantagem de aplicar procedimentos de ET baseados no sensoriamento remoto é que a água consumida no sistema solo-planta-atmosfera pode ser obtida diretamente sem a necessidade de quantificar outros complexos processos hidrológicos.

Segundo Compaoré et al. (2008), o potencial das imagens baseadas no sensoriamento remoto por satélite em examinar padrões espaciais de distribuições regionais da ET foi investigado por vários pesquisadores. Estes esforços resultaram no desenvolvimento de algoritmos que visam a estimativa da ET por sensoriamento remoto em escalas diversificadas. Algoritmos operacionais que tem produzido mapas de ET em escalas locais ou regionais são: o NLDAS (North American land data assimilation systems (Cosgrove et al., 2003)), o LIS (Land Information System (Peters Lidard et al., 2007)), o ALEXI (Atmosphere-Land Exchange Inverse (Anderson et al., 1997)), o DisALEXI (Disaggregated ALEXI model (Agam et al., 2007)), o SEBS (Surface Energy Balance System (Su, 2002)), o S-SEBI (Simplified Surface Energy Balance Index (Roerink et al. 2000)), o SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land (Bastiaanssen et al., 1998a; Bastiaanssen et al., 1998b)), o METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Spatial Resolution with Internalized Calibration (Allen et al., 2007)), bem como outros algoritmos com distintos acrônimos (Ma et al., 2004; Schüttemeyer et al., 2007).

O SEBAL e o METRIC estimam o balanço de energia usando condições térmicas extremas dentro de uma imagem ao escolher os chamados pixels âncoras ou pixels “quente” e “frio”. Estes procedimentos fixam condições limites para o fluxo de calor sensível da superfície do solo (um dos principais componentes do balanço de energia) por meio de

estimativas da temperatura da superfície via satélite. Esta emergente tecnologia tem potencial para ser adotada e usada amplamente pelos comitês de recursos hídricos ao redor do mundo. Os mapas de ET criados usando o SEBAL ou o METRIC, algum dia serão habitualmente aplicados como contribuição operacional diária e mensal e no planejamento de modelos para operações de reservatório, manejo da água no solo, planejamento do suprimento de água na irrigação, regulamentação dos direitos de uso da água, e estudos hidrológicos (Andrade, 2008).

O METRIC difere do SEBAL por utilizar a evapotranspiração de referência (ET_o) calculada por meio de medições em estações meteorológicas (possibilitando melhor qualidade dos mapas de ET), enquanto que o SEBAL pode ser aplicado com poucas medições a nível de superfície. Considerando que muitas regiões do mundo ainda não possuem uma densidade de estações meteorológicas com observações suficientes e, ou, adequadas, o SEBAL surge como uma opção atrativa.

2. Objetivo

Este trabalho objetivou mapear, em escala regional, parâmetros biofísicos e a evapotranspiração real diária no Pantanal com o uso de imagem do sensor Modis/Terra e do algoritmo SEBAL.

3. Material e Métodos

O estudo foi realizado para região do Pantanal que possui área de 138.183 km² (Oliveira et al., 2006) com abrangência dos Estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Conforme informações da ANA (2004), a região do Pantanal possui clima com temperatura média anual variando entre 22°C e 26°C e precipitação média anual de 1400 mm, variando entre 800 mm e 1600 mm. Os maiores índices pluviométricos são observados no planalto. O período chuvoso vai de outubro a abril e concentra cerca de 70 a 80% da precipitação média anual. O Pantanal tem influência biogeográfica dos biomas vizinhos, como o Cerrado a leste, a Amazônia ao norte e o Chaco a sudoeste. A planície aluvionar do Pantanal é formada principalmente por tributários da margem esquerda do rio Paraguai, no território brasileiro, com sua borda oeste tocando o território da Bolívia ao norte e a do Paraguai ao sul. A altitude na planície é, em média, de 60 a 150 m.

No presente trabalho, foram utilizados os dados meteorológicos de velocidade do vento, temperatura do ar e radiação coletados pela Plataforma de Coleta de Dados (PCD) do CPTEC/INPE, localizada no município de Corumbá-MS, juntamente com dados do sensor Modis/Terra do dia 21 de julho de 2008, mais especificamente os produtos MOD09GA e MOD11A1. Estes produtos foram obtidos no formato hdf ao acessar o sítio: <https://wist.echo.nasa.gov/api/>. Posteriormente, foi aplicado o software MRT (MODIS Reprojection Tool) para unir os “Tiles” e converter do formato HDF para GeoTiff. Para o sistema de projeção UTM foi utilizado o elipsóide WGS84. Em sequência, aplicou-se a ferramenta “Layer Selection and Stacking” do software “Erdas Imagine 9.3” para unir as bandas de reflectância. Em seguida, fez o recorte da área do pantanal no software “ArcGis 9.2” utilizando como delimitação o “shape” do projeto PROBIO - EMBRAPA.

O primeiro passo para o mapeamento dos parâmetros biofísicos e da evapotranspiração real diária no Pantanal, foi ajustar o número digital dos pixels ao multiplicá-lo por um fator de escala de 0,0001 para o produto reflectância (MOD09GA) e de 0,02 para o produto LST (MOD11A1). Posteriormente, calculou-se o albedo instantâneo da superfície (α) por meio da equação de Liang (2000):

$$\alpha = 0,160\rho_1 + 0,291\rho_2 + 0,243\rho_3 + 0,116\rho_4 + 0,112\rho_5 + 0,081\rho_7 - 0,0015 \quad (1)$$

Em que, $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_7$, são as bandas de reflectância do produto MOD09GA. Esta e as etapas seguintes do algoritmo SEBAL foram implementadas na ferramenta “Model Maker” do software “Erdas Imagine 9.3”.

Em seguida, obteve a estimativa do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e do índice de vegetação ajustado para o solo (SAVI). Para o caso, foram utilizadas as bandas de reflectância 1 e 2 do produto MOD09GA. Adotou-se o valor 0,5 como fator de ajuste do solo de fundo (L) da equação do SAVI.

No cálculo do índice de área foliar (IAF), definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação, adotou-se a equação empírica sugerida por Allen et al. (2002):

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (2)$$

Após o cálculo do IAF, empregou-se a equação de Stefan-Boltzman para a obtenção da radiação de onda longa emitida pela superfície ($R_{L\uparrow}$, em $W m^{-2}$):

$$R_{L\uparrow} = \epsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (3)$$

Em que, σ é a constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$), T_s é a temperatura da superfície, dada em Kelvin, obtida do produto LST (MOD11A1), ϵ_0 é a emissividade da superfície, dada por (Allen et al., 2002):

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 IAF \quad (4)$$

Considerou-se o valor de $\epsilon_0 = 0,98$ para pixels com $IAF \geq 3$. E, conforme Allen et al. (2002) utilizou-se para corpos d'água ($NDVI < 0$ e $\alpha < 0,47$) o valor de $\epsilon_0 = 0,985$.

A estimativa da radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície ($R_{L\downarrow}$, em $W m^{-2}$), também foi realizada com a equação de Stefan-Boltzman, só que considerando a temperatura do ar para o horário da passagem do satélite juntamente com a emissividade atmosférica (ϵ_a) obtida por meio da equação sugerida por Allen et al. (2002):

$$\epsilon_a = 0,85 (-\ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (5)$$

Em que, τ_{sw} é a transmissividade atmosférica para condições de céu claro, dada por:

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z_a \quad (6)$$

Em que, z_a é a altitude em metros.

A radiação incidente de onda curta ($R_{s\downarrow}$, em $W m^{-2}$), definida como o fluxo de radiação solar direta e difusa que atinge a superfície terrestre, foi estimada para condição de céu claro, da seguinte forma (Allen et al., 2002):

$$R_{s\downarrow} = G_{SC} \cos \theta_z d_r \tau_{sw} \quad (7)$$

Em que, G_{SC} é a constante solar ($1367 W m^{-2}$), θ_z é o ângulo zenital solar e d_r é a distância relativa terra-sol (em unidade astronômica - UA).

Em sequência, estimou-se o saldo de radiação à superfície (R_n , em $W m^{-2}$) para o momento da passagem do satélite sobre a área de estudo (Allen et al., 2002; Sarwar e Bill, 2003):

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (8)$$

O próximo passo foi obter o fluxo instantâneo de calor no solo (G , em $W m^{-2}$) ao aplicar a equação empírica desenvolvida por Bastiaanssen (2000):

$$G = \left[\frac{T_s}{\alpha} (0,0038 \alpha + 0,0074 \alpha^2) (1 - 0,98 NDVI^4) \right] R_n \quad (9)$$

Em que, T_s é a temperatura instantânea da superfície ($^{\circ}C$), α é o albedo instantâneo da superfície e NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada, calculados pixel a pixel.

Para efeito de correção dos valores do fluxo de calor no solo para corpos d'água ($NDVI < 0$), utilizou-se a expressão (Allen et al., 2002):

$$G = 0,3 Rn \quad (10)$$

Em seguida, obteve-se o fluxo de calor sensível instantâneo (H , em $W m^{-2}$) expresso pela taxa de perda de calor para o ar por convecção e condução. Este fluxo é estimado com base na densidade do ar úmido (ρ , em $kg m^{-3}$), no calor específico do ar à pressão constante (c_p , dado por $1004 J kg^{-1} K^{-1}$), na resistência aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah} , em $s m^{-1}$) e na diferença de temperatura (dT) próxima à superfície (Allen et al., 2002):

$$H = \rho c_p \frac{dT}{r_{ah}} = \rho c_p \frac{(a + bT_s)}{r_{ah}} \quad (11)$$

Para encontrar os valores dos coeficientes a e b apresentados na equação anterior, foi preciso definir os pixels “âncoras”. Estes pixels também chamados de “quente” e “frio” ficaram situados na área de estudo. O pixel “frio” foi selecionado numa área com abrangência de corpos d'água ou inundada. Nesse pixel, a temperatura da superfície e a temperatura do ar próxima à superfície foram consideradas iguais, assumindo que o fluxo de calor sensível (H) é igual a zero e fluxo de calor latente (LE) é máximo, nesse caso tem-se: $LE_{frio} = Rn - G$. Já o pixel “quente” foi selecionado em uma área com predominância de solo exposto. Nesse pixel, assumiu-se valor zero para LE e valor máximo para H , ou seja,

$$H_{quente} = Rn_{quente} - G_{quente} = \rho c_p \frac{(a + bT_{S_{quente}})}{r_{ah_{quente}}}, \text{ onde } T_{S_{quente}}, Rn_{quente}, G_{quente} \text{ e } r_{ah_{quente}} \text{ são}$$

obtidos no pixel quente das estimativas instantâneas de T_s , Rn , G e r_{ah} . Como no pixel frio $dT = 0$, ou seja, $a + bT_s = 0$, tem-se um sistema com duas equações e duas incógnitas, o que possibilita o cálculo de a e b , e assim a determinação de H para todos os pixels da imagem. No entanto, para que o H obtido seja adequadamente representativo, é fundamental que se considere a condição de estabilidade atmosférica. Para tanto, o H corrigido foi obtido por meio de processo iterativo ao aplicar a teoria da similaridade de Monin-Obukhov (L , em m), para indicar se a atmosfera está na condição de instabilidade ($L < 0$), estabilidade ($L > 0$) ou neutralidade ($L = 0$). Detalhes de todas as etapas envolvidas no cálculo de H estão apresentados em Allen et al. (2002).

Com a obtenção de Rn , G e H , estimou-se o fluxo de calor latente instantâneo (LE) como um resíduo da equação clássica do balanço de energia (Allen et al., 2002; Sarwar e Bill, 2003):

$$LE = Rn - H - G \quad (12)$$

Em que, LE , Rn , H e G são dados em $W m^{-2}$. Posteriormente, foi possível estimar a fração evaporativa (λ) por meio da expressão sugerida por Bastiaansen et al. (1998b):

$$\lambda = W = \frac{LE}{LE + H} = \frac{LE}{Rn - G} \quad (13)$$

Estudos micrometeorológicos indicam que a fração evaporativa (λ) pode ser considerada constante durante o período diurno (Crago, 1996). Assim, para estimativa da evapotranspiração real diária ($ETr_{diária}$, $mm d^{-1}$), em escala regional, foi empregada a equação proposta por Ayenew (2003):

$$ETr_{diária} = \frac{\lambda Rn_{diário}}{28} \quad (14)$$

Em que, $Rn_{diário}$ é o saldo de radiação obtido pela integração de dados meteorológicos no período de 24 horas (detalhes são apresentados por Ayenew, 2003) e o escalar no denominador representa o fator de conversão de unidade ($W m^{-2}$ para $mm d^{-1}$).

4. Resultados e Discussão

As Figuras 1a, 1b e 1c apresentam, respectivamente, o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), o índice de área foliar (IAF) e o albedo instantâneo da região do Pantanal. O NDVI médio na cena foi de 0,59 e está representado pela classe de cor marrom. Já o valor médio do IAF foi de 2,02. Segundo classificação do projeto PROBIO, as áreas das classes savana estépica (chaco), savana (cerrado) e pecuária (pastagem plantada), apresentaram para o dia 21/07/2008, valores de NDVI oscilando entre 0,31 e 0,60, sendo que, o IAF para estas classes variaram, na maior parte, entre 1,51 e 2,50. No entanto, para as classes de agricultura, outras áreas antrópicas, floresta estacional decidual e semi-decidual, formações pioneiras, vegetação secundária e refúgios vegetacionais o NDVI ficou entre 0,61 e 0,90 e o IAF teve valores entre 2,01 e 4,50 para a maior parte das áreas representadas pelas classes citadas anteriormente. Com relação a classe água, como era esperado, o NDVI foi negativo e o IAF igual a zero (cor ciano nas Figuras 1a e 1b).

O albedo instantâneo médio da região do Pantanal foi de 0,15, sendo que, respectivamente, o valor máximo e mínimo foi de 0 e 0,30. Os valores mínimos de albedo localizaram-se em áreas de corpos d'água (lagos, rios, etc) e os valores máximos foram verificados em áreas com presença de solo exposto. Em grande parte da região do Pantanal o albedo oscilou entre 0,11 e 0,20. No entanto, em algumas áreas antrópicas (agricultura, pecuária, etc) o albedo variou entre 0,16 e 0,25. Nas áreas ocupadas pela classe de formações pioneiras o albedo apresentou valores entre 0,06 e 0,15, sendo justificados pela presença de áreas inundadas. Nas análises realizadas por Pereira et al. (2007) com imagens TM – Landsat 5 (cenas de 30/09/2000, 16/02/2005, 04/03/2005 e 10/07/2005) na região de Passo do Lontra, Corumbá, MS, foram encontrados valores médios de albedo para campo alagado de 0,07, para campo sujo de 0,11, para mata ciliar de 0,14 e para o cerrado de 0,13.

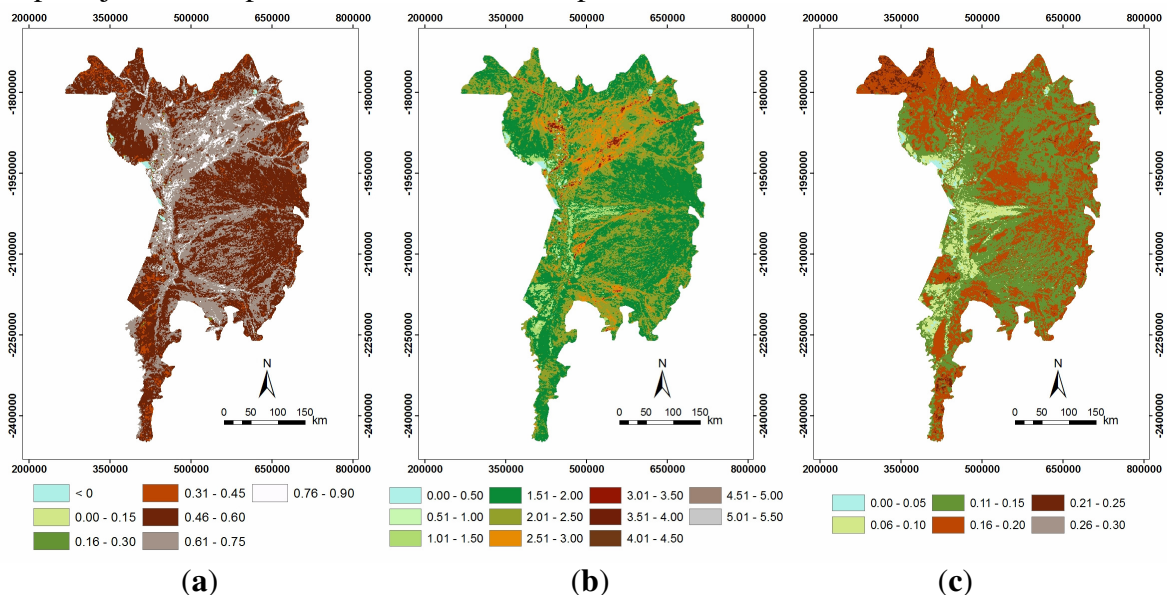


Figura 1. (a) NDVI, (b) índice de área foliar (IAF) e (c) albedo instantâneo da superfície.

As Figuras 2a, 2b e 2c mostram, respectivamente, o fluxo de calor no solo o fluxo de calor sensível (H) e o saldo de radiação (Rn) para o momento de passagem do satélite sobre a região do Pantanal. Conforme Figura 2a, o fluxo de calor no solo (G) variou na cena de 35 W m⁻² a 210 W m⁻², com média de 95 W m⁻². Em áreas ocupadas por pecuária (pastagem plantada), savana (cerrado) e savana estépica (chaco) apresentaram G oscilando entre 91 W m⁻² e 150 W m⁻², entretanto, verificaram-se valores entre 61 W m⁻² e 90 W m⁻² em áreas próximas a classe de formações pioneiras. Nas áreas de formações pioneiras e áreas de

vegetação sobre inundações, observaram que os valores de G variaram entre 35 W m^{-2} e 90 W m^{-2} . Já em áreas de corpos d'água completamente exposto (sem vegetação) foram encontrados os máximos valores de G .

Na **Figura 2b** verificam-se valores instantâneos negativos de H em algumas áreas inundadas e sobre corpos d'água. No entanto, para grande parte das áreas ocupadas pela classe de formações pioneiras, H instantâneo oscilou entre 1 W m^{-2} e 100 W m^{-2} . Já nas áreas de abrangência das classes savana (cerrado) e pecuária (pastagem plantada), observaram grande amplitude dos valores instantâneos de H , ou seja, houve variação de 101 W m^{-2} (áreas próximas às formações pioneiras) a 700 W m^{-2} (em áreas definidas pelas classes de savana e pecuária). Com relação aos valores máximos de H , estes foram registrados em áreas antrópicas com presença de solo exposto. No que se refere aos valores instantâneos de R_n encontrados (**Figura 2c**), verificou-se que em praticamente toda a região que delimita o Pantanal, houve oscilação de R_n instantâneo entre 601 W m^{-2} e 800 W m^{-2} . O R_n médio instantâneo para a região do Pantanal foi de 748 W m^{-2} .

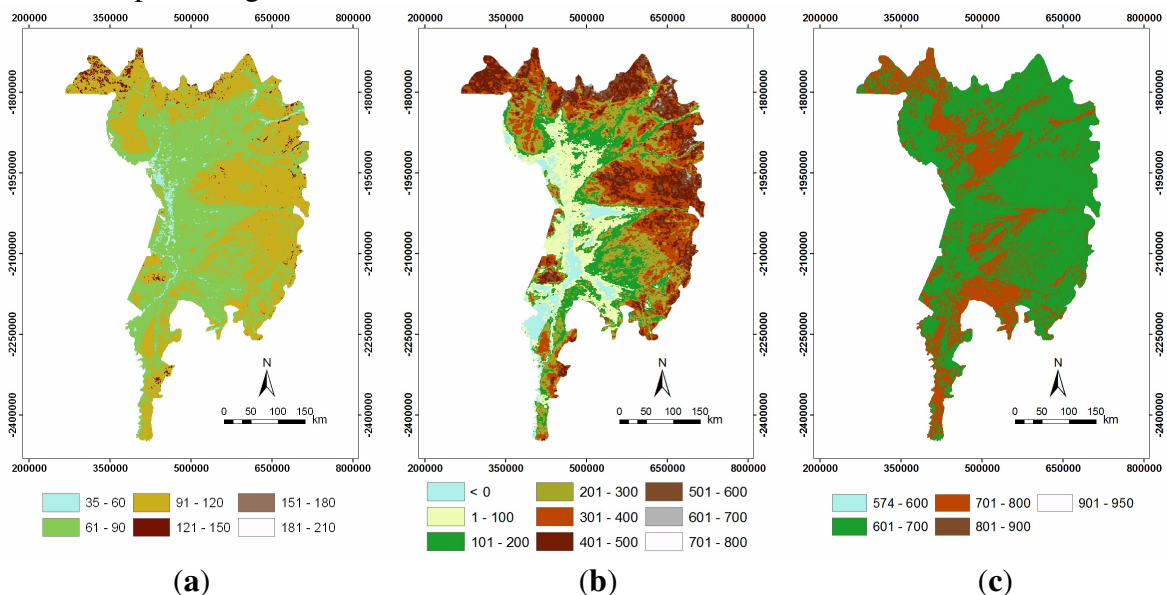


Figura 2. (a) fluxo de calor no solo (G , em W m^{-2}), (b) fluxo de calor sensível (H , em W m^{-2}) e (c) saldo de radiação (R_n , em W m^{-2}) para o momento de passagem do satélite sobre a região do Pantanal.

Os mapas do fluxo de calor latente instantâneo (LE), saldo de radiação diário ($R_{n\text{diário}}$) e da evapotranspiração real diária ($E_{Tr\text{diária}}$) para o dia 21/07/2008 estão apresentados nas **Figuras 3a, 3b e 3c**, respectivamente. Foram encontrados valores de LE instantâneos variando de 0 W m^{-2} (áreas com solo exposto) a 995 W m^{-2} (valores presentes em poucos pixels). No geral, verificou-se que LE oscilou entre 401 W m^{-2} e 900 W m^{-2} nas áreas de abrangência das classes de floresta estacional decidual e semi-decidual, vegetação secundária, formações pioneiras e em algumas áreas de corpos d'água com presença de vegetação. Entretanto, valores de LE entre 0 W m^{-2} e 400 W m^{-2} , predominam sobre as áreas representadas pelas classes de savana (cerrado), pecuária (pastagem plantada) e parte da savana estépica (chaco). Ao analisar o Pantanal como um todo, o LE médio foi de 350 W m^{-2} .

Com relação à estimativa de $R_{n\text{diário}}$, foram encontrados valores mínimos e máximos de 94 W m^{-2} e 165 W m^{-2} , respectivamente. Contudo, houve predominância da classe representada pela cor amarela, com valores entre 121 e 130 W m^{-2} , que contém o valor médio diário do saldo de radiação ($126,5 \text{ W m}^{-2}$) para a região do Pantanal. No que diz respeito às classes com valores mais elevados, estas se concentraram, em grande parte, nas áreas de matas ciliares, lagos, rios ou inundadas. Já as classes de menores valores se concentraram nas

áreas antrópicas com presença de solo exposto. Oliveira et al. (2006) ao estudar a região de Passo do Lontra pertencente ao município de Corumbá, MS, no período de setembro de 2000 a junho de 2002, verificaram que as maiores médias diárias do saldo de radiação ocorreram nos meses de novembro a fevereiro, quando atinge cerca de 231 W m^{-2} , enquanto que nos meses referentes ao período de inverno no hemisfério sul, a média diária foi da ordem de 130 W m^{-2} . Sendo que, no mês de julho de 2001 os valores diários do saldo de radiação foram inferiores a 130 W m^{-2} . Em estudo conduzido por Fraga (2009) entre fevereiro de 2007 e janeiro de 2008 numa área de cambará sazonalmente inundada, município de Barão de Melgaço, MT, foi observado variação do $Rn_{\text{diário}}$ entre a estação seca e úmida, apresentando valores de $97,7 \text{ W m}^{-2}$ e $140,4 \text{ W m}^{-2}$, respectivamente.

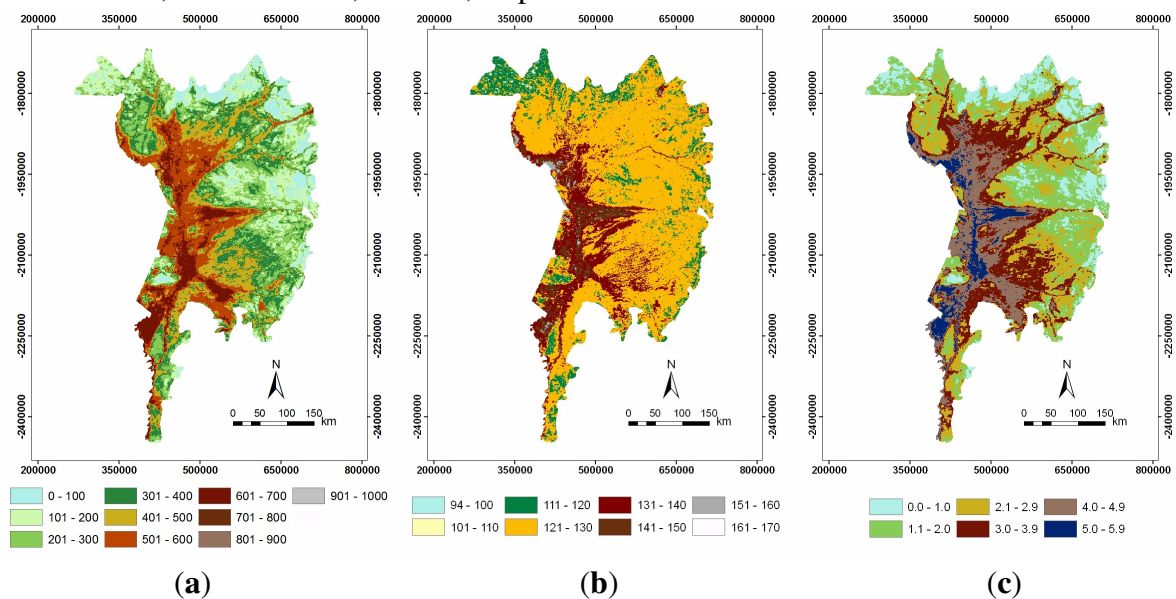


Figura 3. (a) fluxo de calor latente instantâneo (LE, em W m^{-2}), (b) saldo de radiação diário ($Rn_{\text{diário}}$, em W m^{-2}) e (c) evapotranspiração real diária ($ETr_{\text{diária}}$, em mm d^{-1}).

Na **Figura 3c**, observa-se que, a $ETr_{\text{diária}}$ variou de 0 mm d^{-1} (áreas com solo exposto) a $5,9 \text{ mm d}^{-1}$ (superfícies de lagos e rios). A $ETr_{\text{diária}}$ média, da região do Pantanal, foi de $2,6 \text{ mm d}^{-1}$. Nas áreas que se estendem pelas classes de savana (cerrado), pecuária (pastagem plantada) e parte da savana estépica (chaco), a $ETr_{\text{diária}}$ variou de 0 mm d^{-1} a $3,9 \text{ mm d}^{-1}$. Já as áreas que abrangem as classes de floresta estacional decidual e semi-decidual, vegetação secundária, formações pioneiras e em algumas áreas de corpos d'água com presença de vegetação, os valores da $ETr_{\text{diária}}$ oscilaram de $3,0 \text{ mm d}^{-1}$ a $5,9 \text{ mm d}^{-1}$. A classe representada pela cor azul com valores de $5,0 \text{ mm d}^{-1}$ a $5,9 \text{ mm d}^{-1}$ teve predominância de áreas inundadas ou lagos (Figura 3c). Nestas áreas, o saldo de radiação diário (Figura 3b) também foi elevado (131 W m^{-2} a 170 W m^{-2}). Numa área de cambará sazonalmente inundada, município de Barão de Melgaço, MT, Fraga (2009) obteve valores médios diários de ETr variando de $2,7 \text{ mm d}^{-1}$ (nos meses de junho, julho e setembro de 2007) a $5,2 \text{ mm d}^{-1}$ (nos meses de março e dezembro de 2007). Segundo Fraga (2009) a ETr verificada no cambarazal foi maior do que as observadas nos estandes de Jarú, Caxiuanã e Tocantins, e justifica que este fato pode ter ocorrido a princípio pela disponibilidade de água na inundação e posteriormente, pela habilidade da vegetação em extrair água do solo.

5. Conclusões

As estimativas de NDVI, índice de área foliar, albedo da superfície, saldo de radiação instantâneo e dos fluxos instantâneos de calor no solo, sensível e latente com a aplicação do algoritmo SEBAL e imagem Modis/Terra para a região do Pantanal, no dia 21/07/2008, apresentaram valores médios na cena de 0,59, 2,02, 0,15, 748 W m⁻², 95 W m⁻², 254 W m⁻², 350 W m⁻², respectivamente. Além disso, foram encontrados valores de saldo de radiação diário variando de 94 W m⁻² a 165 W m⁻², com média de 126,5 W m⁻². Já a evapotranspiração real diária variou de 0 mm d⁻¹ a 5,9 mm d⁻¹, com média de 2,6 mm d⁻¹. Os resultados preliminares aqui obtidos sugerem que, numa escala regional com poucos dados observacionais, a utilização do algoritmo SEBAL juntamente com imagem Modis/Terra, tem potencial para aplicação na região do Pantanal como fonte de informação complementar em diversos estudos relacionados com a descrição de processos biofísicos do sistema solo-planta-atmosfera.

6. Referências

- Agam, N.; Kustas, W. P.; Anderson, C. M.; Li, F.; Colaizzi, P. D. Utility of thermal sharpening over Texas high plains irrigated agricultural fields. **Journal of Geophysical Research**, v. 112 (D19110), doi:10.1029/2007JD008407), 2007.
- Agência Nacional de Águas – ANA... [et al.]. **Implementação de práticas de gerenciamento integrado de bacia hidrográfica para o Pantanal e a bacia do alto Paraguai ANA/GEF/PNUMA/OEA: Programa de ações estratégicas para o gerenciamento integrado do Pantanal e bacia do alto Paraguai: Relatório Final**. Brasília: TDA Desenho & Arte Ltda., 2004. 316p.
- Allen, R. G.; Tasumi, M.; Trezza, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, p. 380-394, 2007.
- Allen, R.; Tasumi, M.; Trezza, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) - **Advanced Training and Users Manual - Idaho Implementation**, version 1.0, 2002, 98p.
- Anderson, M. C.; Norman, J. M.; Diak, G. R.; Kustas, W. P.; Mecikalski, J. R. A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 60, p. 195-216, 1997.
- Andrade, R. G. **Aplicação do algoritmo Sebal na estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada da cana-de-açúcar**. 2008. 135 p. UFV. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2008.
- Aynew, T. Evapotranspiration estimation using thematic mapper spectral satellite data in the Ethiopian rift and adjacent highland. **Journal of Hydrology**, v. 279, p. 83-93, 2003.
- Bastiaanssen, W. G. SEBAL - based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87-100, 2000.
- Bastiaanssen, W. G. M.; Menenti, M.; Feddes, R. A.; Holtslag, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198-212, 1998a.
- Bastiaanssen, W. G. M.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Ma, Y.; Moreno, J. F.; Roerink, G. J.; van der Wal, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 213-229, 1998b.
- Compaoré, H.; Hendrickx, J. M.; Hong, S.; Friesen, J.; van de Giesen, N. C.; Rodgers, C.; Szarzynski, J.; Vlek, P. L. G. Evaporation mapping at two scales using optical imagery in the White Volta Basin, Upper East Ghana. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 33, p. 127-140, 2008.
- Cosgrove, B. A.; Lohmann, D.; Mitchell, K. E.; Houser, P. R.; Wood, E. F.; Schaake, J.; Robock, A.; Marshall, C. H.; Sheffield, J.; Luo, L.; Duan, Q.; Pinker, R.; Tarpley, J. D.; Higgins, R. W.; Ming, J. Real-time and retrospective forcing in the North American Land Data Assimilation Systems (NLDAS) project. **Journal of Geophysical Research**, v. 108 ((D22), 8842. doi: 10.1029/2002JD003118), 2003.

Crago, R. D. Conservation and variability of the evaporative fraction during the daytime. **Journal of Hidrology**, v. 180, p. 173-194, 1996.

Fraga, C. I. M. **Evapotranspiração e fator de desacoplamento em área de cambarazal no Pantanal**. 2009. 56 p. UFMT. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá. 2009.

Liang, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, p. 213-238, 2000.

Ma, Y.; Menenti, M.; Tsukamoto, O.; Ishikawa, H.; Wang, J.; Gao, Q. Remote sensing parameterization of regional land surface heat fluxes over arid area in northwestern China. **Journal of Arid Environments**, v. 57, p. 117-133, 2004.

Oliveira, M. B. L.; Randow, C. V.; Manzi, A. O.; Alvalá, R. C. S.; Sá, L. D. A.; Leitão, M. M. V. B. R.; Souza, A. Fluxos turbulentos de energia sobre o Pantanal sul mato-grossense. **Revista Brasileira de Meteorologia**, n. 3b, v. 21, p. 159-165, 2006.

Pereira, G.; Moraes, E. C.; Arai, E.; Oliveira, L. G. L. Estudo preliminar da estimativa da reflectância e albedo de microssistemas pantaneiros a partir de imagens de satélite. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 59, v. 1, p. 55-61, 2007.

Peters-Lidard, C. D.; Houser, P. R.; Tian, Y.; Kumar, S. V.; Geiger, J.; Olden, S.; Lighty, L.; Doty, B.; Dirmeyer, P.; Adams, J.; Mitchell, K.; Wood, E. F.; Sheffield, J. High-performance Earth system modeling with NASA/GSFC's Land Information System. **Innovations in Systems and Software Engineering**, v. 3, p. 157-165, 2007.

Roerink, G.; Su, Z.; Menenti, M. A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth (B)**, v. 25, n.2, p. 147-157, 2000.

Sarwar, A.; Bill, R. Estimation of surface heat fluxes in the Indus Basin using Aster imagery. **Pakistan Journal of Water Resources**, n. 1, v. 7, p. 53-63, 2003.

Schüttemeyer, D.; Schillings, C.; Moene, A. F.; Bruin, H. A. Satellite-based actual evapotranspiration over drying semiarid terrain in West Africa. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 46, p. 97-111, 2007.

Su, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 6, n. 1, p. 85-99, 2002.