

Estimativa de evapotranspiração real a partir de imagens do sensor MODIS/AQUA e do algoritmo SEBAL na bacia do Rio Paranaíba – Brasil

Real evapotranspiration estimate from images of MODIS/AQUA sensor and SEBAL algorithm in Paranaíba river basin – Brazil

Alécio Perini Martins

Doutor em Geografia. Universidade Federal de Goiás – Regional Jataí. Unidade Acadêmica Especial de Estudos Geográficos.
alecioperini@yahoo.com.br

Roberto Rosa

Doutor em Geografia. Universidade Federal de Uberlândia – Instituto de Geografia.
rrosa.geo@gmail.com

Resumo

A pesquisa visou avaliar a utilização de dados do sensor MODIS/AQUA para estimar valores de evapotranspiração real em superfície na bacia do Rio Paranaíba - Brasil. Foi utilizado o algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land), desenvolvido a partir de princípios físicos envolvidos na reflexão, transmissão e absorção de energia pela superfície, necessitando de poucos dados de campo e, portanto, permitindo o estudo de extensas áreas. Foram obtidos valores médios de 3,4 mm/dia para evapotranspiração real, sendo os maiores valores observados nos meses de novembro e dezembro e os menores no mês de outubro. Corpos d'água e áreas com vegetação arbórea densa (formações florestais e silvicultura) apresentaram valores médios de evapotranspiração acima de 5 mm/dia, enquanto que em áreas urbanas e com solo sem cobertura vegetal esses valores médios não ultrapassaram 2 mm/dia.

Palavras-chave: Evapotranspiração Real; Sensoriamento Remoto; Modelagem Climatológica.

Abstract

The research aimed to evaluate the use of data in sensor MODIS/AQUA to estimate values of real evapotranspiration in the surface of the Rio Paranaíba river basin - Brazil. We used the SEBAL algorithm (Surface Energy Balance Algorithms for Land), developed from physical principals involved in the reflection, transmission and absorption of energy by the surface, requiring few field data and, therefore, allowing the study of large areas. We obtained average values of 3.4 mm/day to real evapotranspiration, where the higher values were observed in November and December and the lowest ones in October. Water bodies and areas with dense woody vegetation (forests and forestry formations) presented average values of evapotranspiration above 5 mm/day, while in urban areas and with soil without vegetation coverage these values did not exceed 2 mm/day.

Keywords: Real Evapotranspiration; Remote Sensing; Climatological Modeling.

1. INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta resultados de uma tese de doutorado desenvolvida com o objetivo de avaliar a utilização de dados do sensor MODIS/AQUA para estimar valores de evapotranspiração

real em superfície na bacia do Rio Paranaíba. Acessoriamente, foi necessário mapear outras variáveis como uso da terra, índice de vegetação e parâmetros biofísicos como albedo, temperatura de superfície, saldo de radiação e fluxos de calor para, então, estimar os valores de evapotranspiração utilizando imagens de sensoriamento remoto e ferramentas de geoprocessamento.

A evapotranspiração pode ser definida como a forma pela qual a água da superfície terrestre passa para a atmosfera em estado de vapor, sendo uma fração fundamental do ciclo hidrológico. Além da evaporação da água superficial, abrange os processos evaporativos do solo e da vegetação úmida, além da transpiração dos animais e vegetais. Assim, o conhecimento das taxas diárias de evapotranspiração é de grande utilidade para determinar a necessidade hídrica na agricultura, principalmente em áreas irrigadas.

Entre os principais fatores que controlam o processo de evapotranspiração, destacam-se a radiação solar, a temperatura do ar, a velocidade dos ventos, a umidade relativa do ar e a pressão atmosférica, além dos processos de precipitação que são responsáveis pela entrada de água no sistema e disponibilização desse recurso para as plantas e também para a evaporação.

O saldo de radiação líquida (R_n) representa a principal fonte de energia para o processo de evapotranspiração e constitui a primeira fase de implementação do modelo SEBAL, dependendo de parâmetros como albedo, emissividade e temperatura de superfície para ser estimada. Como é dependente da reflexão da superfície, quanto mais clara a vegetação, maior a reflexão e, portanto, menor a energia disponível, o que explica o fato de florestas densas apresentarem maior potencial de evapotranspiração do que áreas cultivadas ou pastagens.

O termo evapotranspiração pode ser aplicado em várias conceituações, sendo as de evapotranspiração potencial (ou de referência), evapotranspiração real e evapotranspiração da cultura as mais comuns e com maior importância para as atividades agrícolas. Manning (1997), define a evapotranspiração potencial como a perda total de água que ocorre a partir de uma cultura verde e de baixo porte, geralmente grama, em extensa área e que sombreia completamente o chão, onde nunca falta água. Pode ser medida com o uso de lisímetros, sendo considerada como uma “condição ideal” de evapotranspiração. Já a evapotranspiração real, estimada nesse trabalho a partir de modelagem por sensoriamento remoto, ocorre independentemente das condições definidas para a evapotranspiração potencial, isto é, em quaisquer circunstâncias, independente das condições atmosféricas ou dos limites impostos pelas culturas e, portanto, apresentando valores menores do que os apresentados pela evapotranspiração potencial.

Entre as características da vegetação que influenciam diretamente os padrões de evapotranspiração, estão: o albedo, que interfere no balanço de energia; a espécie, cujas características morfológicas determinam a transpiração na planta, bem como a profundidade das raízes; a altura das plantas e seu índice de área foliar, que podem aumentar a superfície transpirante.

Outros fatores que podem interferir nos processos de evapotranspiração estão relacionados com a umidade dos solos, visto que alguns solos apresentam características morfológicas que permitem um armazenamento maior ou menor de água, e nas técnicas de manejo dos solos e das culturas.

Entre os diversos modelos climato-hidrológicos utilizados para a estimativa da evapotranspiração, como por exemplo o SVAT (*Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Model*) e o METRIC (*Mapping evapotranspiration at high resolution and with internalized calibration*), optou-se pelo uso do SEBAL, principalmente, em decorrência da extensão da área de estudo, da escassez de dados climatológicos (séries históricas) e da facilidade de operação do modelo, que necessita de poucas informações de campo para estimar a evapotranspiração.

De acordo com o criador do modelo, Bastiaanssen (1995), o desenvolvimento do SEBAL teve como principal estímulo superar problemas apresentados por alguns algoritmos na estimativa de fluxos de superfície a partir de imagens de sensoriamento remoto. Bastiaanssen et al. (1998), destacam que os principais problemas apresentados pelo SEBAL relacionam-se à questão de os dados serem instantâneos, o que tornam as estimativas diárias e sazonais relativamente deficientes para escalas mais detalhadas. O maior problema encontrado durante a aplicação do modelo, no entanto, relaciona-se à determinação de variáveis como a resistência aerodinâmica da superfície (R_{ah}), a velocidade de atrito dos ventos (U^*) e dos coeficientes de rugosidade (Z_{om}), que interferem diretamente no cálculo do fluxo de calor sensível e, conseqüentemente, no calor latente de evaporação e na evapotranspiração.

Segundo BASTIAANSEN et al. (2005), a precisão típica do SEBAL na estimativa da ET real é cerca de 85% para um dia e para escalas da ordem de 1 km². Já considerando medidas sazonais da ET real, a precisão cresce para 95%, enquanto que para a evapotranspiração real anual, em grandes bacias, a precisão é, em média, 96%. Estes mesmos autores sugerem que o SEBAL pode ser utilizado, dentre outras aplicações, para: 1) estabelecer relação entre o uso da terra e o uso hídrico para fins de planejamento hídrico de uma bacia hidrográfica; 2) avaliar a performance de sistemas de irrigação; 3) entender os impactos ambientais oriundos da extração de água do solo; 4) implementar modelagens hidrológicas; 5) monitorar a degradação da vegetação nativa; 6) estimar a produtividade hídrica das culturas. (NICÁCIO, 2008, p. 57)

Como a grande maioria dos estudos encontrados como base de comparação foram desenvolvidos em áreas temperadas ou semi-áridas e, em maioria, utilizando imagens AVHRR/NOAA ou TM/Landsat, não foi possível comparar os resultados obtidos com trabalhos de outros pesquisadores, embora seja possível fazer inferências nos resultados a partir dos dados de evaporação registrados nas estações convencionais do INMET. Neste estudo, considera-se que a precisão dos dados estimados esteja próxima a 90%, visto que a escala de mapeamento é de 1:2.000.000 (MOREIRA et. al, 2010).

Conforme o levantamento bibliográfico realizado, a grande maioria das pesquisas que utilizam o SEBAL foram desenvolvidas em regiões do norte do continente africano, oriente médio,

áreas com clima mediterrâneo e no meio-oeste dos Estados Unidos. No Brasil, o maior volume de pesquisas encontra-se nas Universidades Federais de Campina Grande, do Rio de Janeiro, Pernambuco, Estadual do Rio de Janeiro e Norte Fluminense, além de grupos de pesquisa vinculados à Embrapa e ao INPE.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A evapotranspiração representa uma fração importante do ciclo hidrológico, na qual evaporação e transpiração atuam em conjunto no transporte hídrico entre a superfície terrestre e a atmosfera.

De acordo com Allen et al. (2002), o cálculo da evapotranspiração pode ser feito com bastante precisão usando lisímetros, técnicas de correlação e a técnica de razão de Bowen mas, embora apresentem uma maior precisão, estes métodos são limitados por fornecerem valores de evapotranspiração para pontos específicos e não em escala regional. Nesse sentido, as técnicas de sensoriamento remoto têm se mostrado importantes para avaliar a evapotranspiração em escalas menores. A grande vantagem encontrada na utilização de modelos alimentados por imagens obtidas por detecção remota é que a evapotranspiração pode ser calculada sem a necessidade de quantificação de outros processos hidrológicos mais complexos.

O SEBAL é um dos mais completos modelos para estudos de fluxo de calor na superfície com o uso de imagens de satélite e algumas informações climatológicas, como temperatura do ar e velocidade dos ventos. Essencialmente matemático, o modelo evita o emprego de suposições, diminuindo a margem de erro em sua validação.

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) opera em 36 canais espectrais, com resolução espacial variando de 250 a 1.000 metros e com imagens disponibilizadas gratuitamente em formato “hdf”, facilmente convertido para “tif”, em 12 bits, com diferentes aplicações terrestres.

Em especial, os produtos MOD09 (plataforma TERRA) e o MYD09 (plataforma AQUA) podem ser utilizados como dado de entrada para a obtenção de diversas informações, como albedo, índice de vegetação, fluxo de calor no solo e evapotranspiração, fundamentais à pesquisa proposta. Destacam-se, ainda, os produtos MOD11 (plataforma TERRA) e MYD11 (plataforma AQUA), voltados especificamente para o mapeamento da temperatura superficial terrestre (TST) e emissividade, utilizados para estimar a TST em diferentes categorias de uso da terra e cobertura vegetal.

As imagens encontram-se em projeção sinusoidal, organizadas em “tiles” de 10 x 10 graus, numerados de 0 a 35 (H) no sentido longitudinal e de 0 a 17 (V) no sentido latitudinal, cobrindo toda

a superfície do planeta. Para cobrir toda a extensão da bacia do Rio Paranaíba, foram utilizados os *Tiles* H12V10, H13V10 e H13V11.

As imagens dos produtos do sensor MODIS (satélite TERRA ou AQUA), em formato “.hdf” podem ser obtidas gratuitamente no site “<http://modis.gsfc.nasa.gov/>”. Outra facilidade disponibilizada pelo USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos) é a versão online do *Modis Reprojection Tool* (<https://mrtweb.cr.usgs.gov/>), onde o usuário pode escolher as imagens de seu interesse (*Tiles*), definir os produtos MODIS que serão necessários em seus estudos e fazer o download das imagens já mosaicadas, convertidas para formato .tif e com o sistema de referência escolhido pelo usuário.

Para compreender os resultados gerados a partir da aplicação do algoritmo SEBAL é preciso analisar as diversas etapas em que ele se subdivide, sendo a primeira variável o balanço de energia na superfície que, conforme apresentado na figura 1, é calculado a partir da estimativa das radiações de onda curta e longa incidente e refletida pela superfície, além do albedo e da emissividade da superfície.

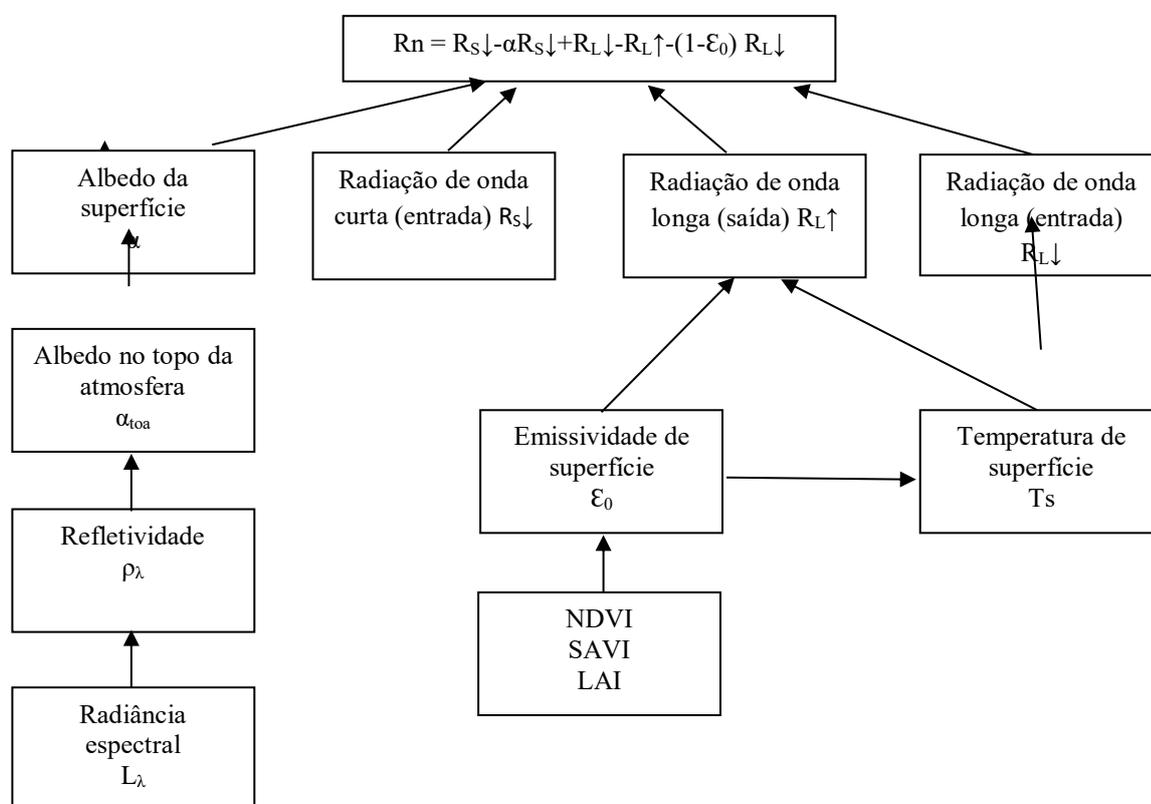


Figura 1 - Organograma do cálculo do saldo de radiação à superfície (R_n).

Fonte: Adaptado de Allen et al. (2002) - Organização dos autores.

Posteriormente, calcula-se o fluxo de calor no solo, o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente, indispensáveis para a estimativa da evapotranspiração real. O fluxo de calor no solo (G) é a taxa de armazenamento de calor no solo e vegetação devido ao fenômeno da condução. O valor

de G pode ser calculado pela equação 1, desenvolvida por Bastiaanssen (2000) e descrita por Allen et al. (2002), Nicácio (2008), entre outros, representando valores próximos ao meio dia e, no caso das imagens utilizadas, aproximadamente às 14:30h:

$$G = [Ts/\alpha(0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1 - 0,98NDVI^4)]Rn \quad (1)$$

Onde Ts é a temperatura de superfície (em graus Celsius); α o albedo de superfície; NDVI o índice de vegetação; Rn o saldo de radiação à superfície.

O fluxo de calor sensível (H) é a taxa de perda de calor para o ar por convecção e condução, graças a uma diferença de temperatura, calculado de acordo com a equação 2, descrita por Allen et al. (2002):

$$H = \frac{\rho * cp * dT}{rah} \quad (2)$$

Onde ρ é a densidade do ar (1,15 kg/m³); cp é o calor específico do ar (1004J/kg⁻¹/K); dT (k) é a diferença da temperatura entre duas alturas; e rah é a resistência aerodinâmica para transporte de calor (m/s). O fluxo de calor sensível é uma função da variação de temperatura, velocidade do vento e rugosidade da superfície, necessitando, assim, de informações climatológicas obtidas em estações de observação de superfície.

Com os valores do saldo de radiação à superfície (Rn), fluxo de calor no solo (G) e fluxo de calor sensível (H), torna-se possível calcular o fluxo de calor latente instantâneo, também medido em W/m² (equação 3) e, conseqüentemente, os valores para evapotranspiração horária, diária, mensal e sazonal.

$$\lambda ET = Rn - G - H \quad (3)$$

Entende-se como fluxo de calor latente (λET) a taxa de perda de calor latente a partir da superfície ocasionado pela evapotranspiração, podendo ser calculado para cada pixel. Esse valor pode ser convertido para a taxa de evaporação horária (ETh) conforme a equação 4 apresentada por Allen et al. (2002).

$$ETh = 3600 * \lambda ET / \lambda \quad (4)$$

Onde λ corresponde ao calor latente de evaporação (equação 5, dada em J/Kg e descrita por HARRISSON, 1963) e 3600 é o valor de conversão de segundos para horas (BASTIAANSSEN et al. 1998; NICÁCIO, 2008)

$$\lambda = [2,501 - 0,00236 * (Ts - 273,16)] * 10^6 \quad (5)$$

Allen et al. (2002), destacam também a necessidade de cálculo da Fração Evaporativa (Λ), descrita por Bastiaanssen (1998) a partir do fluxo de calor latente, do saldo de radiação e do fluxo de calor no solo (equação 6):

$$\Lambda = \frac{LE}{Rn-G} \quad (6)$$

O conhecimento da fração evaporativa é importante para o cálculo do valor de referência da evapotranspiração (ET_{rF} , equação 7), definida como a razão entre a evapotranspiração instantânea para cada pixel (E_{th}) e a Evapotranspiração de referência (E_{To}), proposta pela FAO e calculada a partir de dados meteorológicos como temperatura do ar, velocidade dos ventos, umidade relativa do ar, duração do fotoperíodo e pressão atmosférica. Os dados de Evapotranspiração de Referência foram calculados utilizando o software E_{To} calculator, disponibilizado para download na página da FAO (<http://www.fao.org/nr/water/eto.html>), a partir dos dados obtidos em estações convencionais do INMET para as mesmas datas das imagens utilizadas.

De acordo com Allen et al. (2002), os valores de ET_{rF} são semelhantes ao coeficiente da cultura (K_c), variando de 0 a 1 e ocasionalmente atingindo valores de 1,1, quando a evapotranspiração instantânea for significativamente superior à evapotranspiração de referência. Em testes realizados durante a aplicação do modelo, verificou-se que não existem grandes diferenças nos resultados quando se utiliza a fração evaporativa como evapotranspiração de referência, nem quando ET_{rF} é substituída pelo coeficiente da cultura mapeada como uso da terra e cobertura vegetal. Os autores ainda destacam que podem ocorrer valores negativos de ET_{rF} ocasionados por erros em etapas anteriores do modelo, principalmente no cálculo do balanço de energia.

$$ET_{rF} = \frac{E_{th}}{E_{To}} \quad (7)$$

Os valores diários de evapotranspiração (ET_{24} , equação 8) na maioria das vezes são mais úteis que valores de evapotranspiração horária. De acordo com Allen et al. (2002), o SEBAL calcula a evapotranspiração diária assumindo que a ET_{rF} instantânea é a mesma que a média de 24 horas.

$$ET_{24} = ET_{rF} * E_{To24} \quad (8)$$

Onde E_{To24} (mm/dia) é o acumulado de E_{To} em 24 horas para o dia de obtenção da imagem, calculado a partir da soma dos valores de E_{To} horários ao longo do dia.

Durante a aplicação do modelo foram identificadas dificuldades de estimativa de evapotranspiração diária a partir de dados de evapotranspiração de referência, principalmente em virtude da extensão da área e da escassez de dados meteorológicos para o cálculo da E_{To} .

Para a aplicação do modelo, bem como o processamento das imagens e geração dos mapas temáticos, foi utilizado o software ArcGis 10.1® licenciado para o Laboratório de Geoinformação da Universidade Federal de Goiás/Regional Jataí, especificamente com as extensões 3D Analyst, GeoStatistical Analyst Tools e Spatial Analyst Tools.

Inicialmente, foram selecionadas imagens diárias com o mínimo de cobertura de nuvens possível para todos os meses de 2013, utilizando imagens dos dias 31 de julho (dia juliano 212) e 02 de agosto (dia juliano 214) para calibração do modelo (menor cobertura de nuvens), além de 1 imagem de cada mês do ano de 2013, com o menor percentual de cobertura de nuvens. As imagens,

previamente tratadas no MRT, foram adicionadas à tela de trabalho do ArcGis 10.1®, onde os valores dos pixels foram multiplicados por um fator de escala de 0,0001 (ajuste dos números digitais dos pixels). Após a conversão, foi calculado o albedo de superfície utilizando a ferramenta “Raster calculator”, onde criou-se uma equação com matemática de bandas. A mesma ferramenta foi utilizada para o cálculo do NDVI, SAVI e LAI, nesse caso, utilizando apenas as bandas 1 e 2 do MYD09GA.

Para o cálculo da temperatura de superfície, em graus Kelvin, utilizou-se o produto MYD11A1, multiplicando por um fator de escala de 0,02 para ajustar os valores dos números digitais. Para transformar os dados de temperatura em graus Celsius, padrão utilizado no Brasil, subtrai-se o valor de 273,15 de cada pixel utilizando a ferramenta Raster Calculator.

Após a geração das imagens classificadas, passou-se ao processo de reclassificação pela ferramenta reclassify, também da extensão Spatial Analyst Tools adotando classes com intervalos definidos manualmente a partir da amplitude apresentada, de forma que as informações ficassem bem representadas e permitissem comparações espaciais e temporais.

O mapa de uso da terra e cobertura vegetal foi elaborado para a imagem de abril de 2013 (MYD09A1 em composição de 08 dias, sem cobertura de nuvens) a partir das bandas 1, 2 e 7 em composição 7R2G1B. As imagens, já georeferenciadas, foram convertidas em formato “.tif” e resolução de 8 bits e posteriormente classificada, inicialmente, de forma não-supervisionada pela ferramenta “multivariate-isocluster” do Spatial Analyst Tools (segmentação), com detalhamento de 5 níveis de cinza para áreas de 3 pixels, com 60 classes que posteriormente foram reclassificadas em 06: corpos d’água, pastagens, área urbana, agricultura/silvicultura, solo descoberto, cerrado e floresta (vegetação natural/área de preservação) em processo de reclassificação visual. Posteriormente, as áreas de agricultura e solo descoberto foram agrupadas, visto que ambas representam áreas destinadas às práticas agrícolas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área escolhida para as experimentações da pesquisa é representada pela Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba (figura 2), um dos principais afluentes da Bacia do Rio Paraná, com área aproximada de 230.000 km².

A bacia do rio Paranaíba é a segunda maior unidade da Região Hidrográfica do Paraná, ocupando 25,4% de sua área (...). Posicionada na região central do Brasil, ocupa cerca de 2,6% do território nacional e inclui os estados de Goiás (63,3%), Mato Grosso do Sul (3,4%) e Minas Gerais (31,7%), além do Distrito Federal (1,6%). A bacia possui 197 municípios, além do Distrito Federal. Destes, 28 sedes municipais se encontram fora dos limites da bacia (ANA, 2013).

Rosa e Sano (2014) em mapeamento de uso da terra e cobertura vegetal elaborado a partir de imagens do sensor TM/Landsat do ano de 2010 (resolução de 30 metros), apontam que 68% da área encontra-se ocupada por atividades agropecuárias, sendo 27% para agricultura (incluindo

agricultura irrigada) e 41% por pecuária (corte e leite). Esses dados demonstram o grau de ocupação das terras, bem como a vocação regional para atividades que vêm transformando os cenários econômico e ambiental na região nos últimos 40 anos.

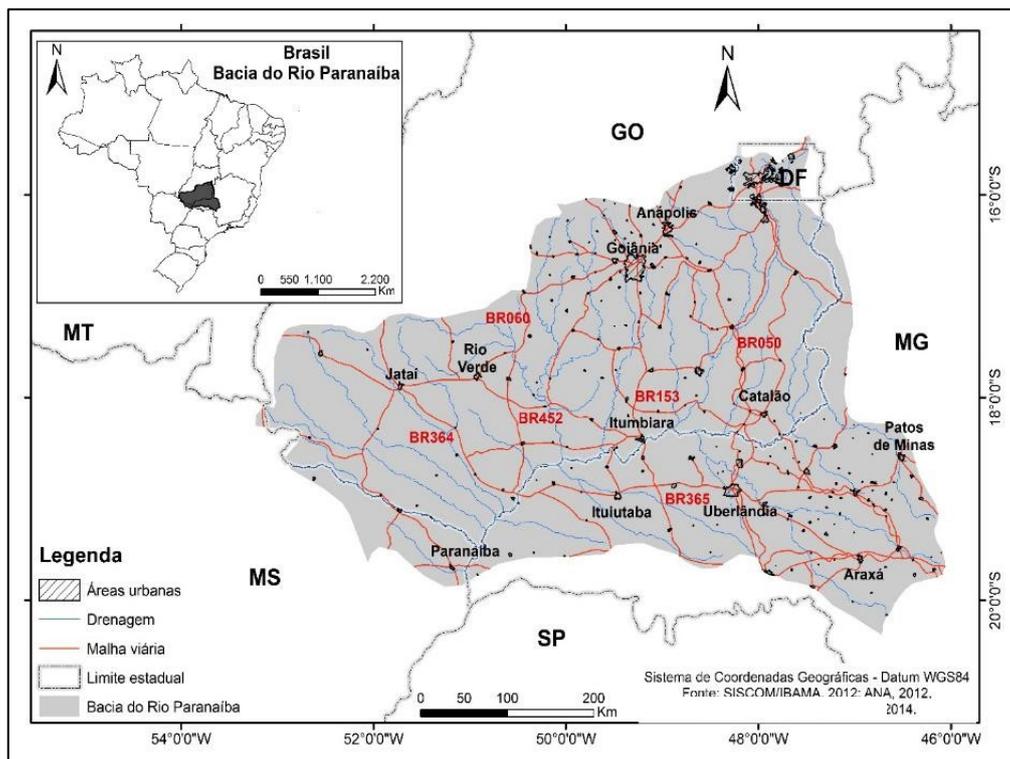


Figura 2 - Localização da área de estudo.

Fonte: Organização dos autores.

No mapeamento de uso da terra e cobertura vegetal elaborado a partir de imagens do sensor MODIS/AQUA (resolução de 250 metros), para o mesmo período da estimativa do saldo de radiação realizado neste trabalho (ano de 2013), foi identificada uma área de 31% ocupada com agricultura e 40% com pastagem, correspondendo a 71% da área de estudo. As áreas com vegetação natural, que incluem formações florestais e diversas fitofisionomias de cerrado, estão restritas a 27% da área, com tendência a diminuir nos próximos anos.

Na figura 03 é possível observar que as atividades agrícolas estão concentradas na porção mineira da bacia do Rio Paranaíba e em regiões goianas próximas aos municípios de Jataí, Rio Verde, Itumbiara, Catalão, Cristalina e Morrinhos. As áreas de pastagem, que representam a forma inicial de ocupação e “abertura econômica” da região apresentam-se bem distribuídas pelo território, enquanto áreas de vegetação natural encontram-se restritas em áreas de proteção ambiental, como no Parque Nacional das Emas (extremo oeste da bacia), o Parque Nacional de Brasília (Distrito Federal), o Parque Nacional da Serra da Canastra (extremo sudeste da bacia, em Minas Gerais) e regiões de difícil ocupação agropecuária devido às características do meio físico, declividade, etc.

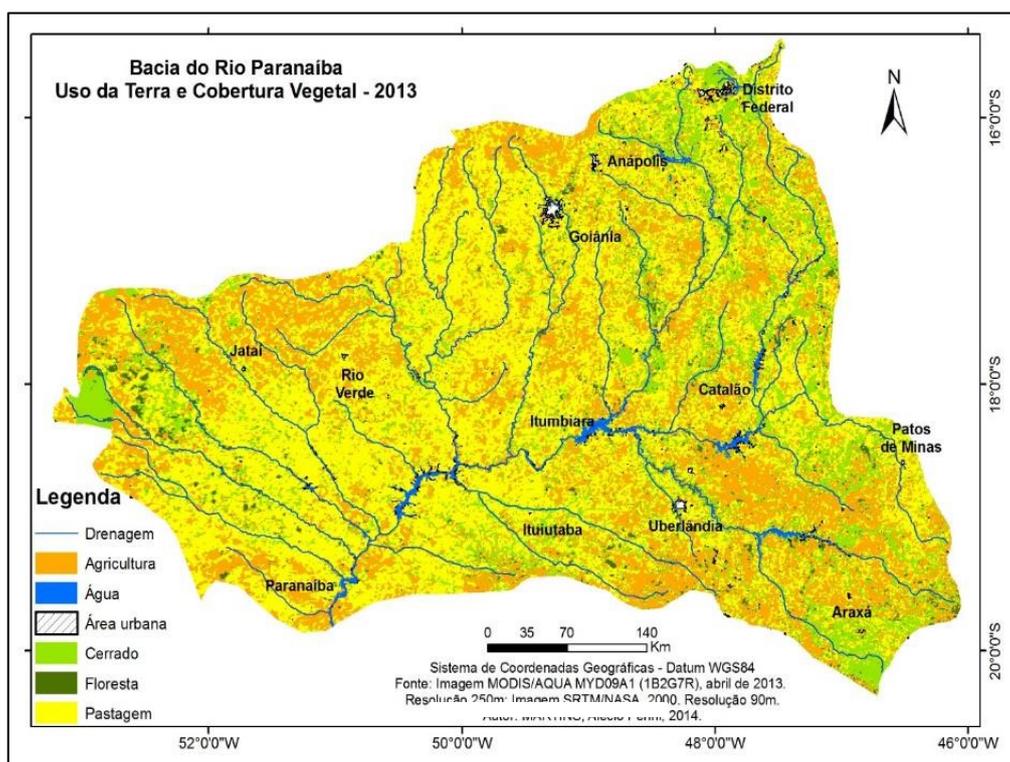


Figura 3 - Uso da Terra e Cobertura Vegetal na Bacia do Rio Paranaíba – 2013.

Fonte: Organização dos autores.

Para calcular a evapotranspiração instantânea, considerou-se o fluxo de calor latente e o calor latente de evaporação (λ) que, multiplicados por 3600, fornecem a fração de água evaporada em 1 hora em cada pixel. Esses valores dependem do cálculo de fluxo de calor sensível e, portanto, podem estar superestimados ou subestimados, dependendo da confiabilidade dos dados de velocidade dos ventos utilizados. Ressalta-se, ainda, que esses dados foram calculados para as 14:30h, horário aproximado de passagem do satélite pela região.

Nas figuras 4 e 5, que trazem os valores mapeados de evapotranspiração instantânea para os dias 31/07/2013 e 02/08/2013, respectivamente, observa-se que os menores valores são apresentados pelas áreas com solo descoberto e pastagem degradada. A média de evapotranspiração instantânea foi de 0,69 mm/h para o dia 31/07 e de 0,46 mm/h para o dia 02/08, considerando que a maior parte da área de estudo encontra-se coberta por pastagens, áreas de solo agrícola descoberto e formações savânicas abertas. Em ambos os mapas, os maiores valores de E_{Th} foram registrados sobre áreas de espelhos d'água, silvicultura e vegetação florestal densa, chegando a índices próximos a 0,9 mm/h.

De acordo com a tabela 1, que expõe a variação sazonal da evapotranspiração instantânea, os maiores valores foram registrados nos meses de novembro e dezembro, relacionado principalmente ao volume de chuvas registrado e aos baixos valores de fluxo de calor sensível, que aumentou proporcionalmente o fluxo de calor latente. Os menores valores foram registrados no mês de outubro, final do período de estiagem na região.

Tabela 1 - Valores médios de evapotranspiração instantânea (mm/h) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal obtidos por tabulação cruzada para a Bacia do Rio Paranaíba (2013).

USO	18/1	14/2	14/3	17/4	01/5	13/6	31/7	02/8	26/9	10/10	26/11	04/12	MÉD
Agricultura	0,59	0,67	0,48	0,86	0,96	0,91	0,47	0,45	0,79	0,28	1,17	1,08	0,73
Agricultura irrigada	0,54	0,71	0,48	0,74	0,89	0,86	0,59	0,59	0,63	0,31	0,94	0,99	0,69
Água	0,74	0,74	0,59	0,89	1,00	0,97	0,73	0,83	1,15	0,78	1,13	1,14	0,89
Área urbana	0,27	0,21	0,33	0,26	0,47	0,44	0,37	0,33	0,39	0,06	0,64	0,71	0,37
Cerrado	0,49	0,50	0,43	0,70	0,85	0,75	0,67	0,60	0,59	0,28	0,89	1,12	0,66
Floresta	0,73	0,86	0,57	0,83	0,98	0,95	0,69	0,70	0,79	0,50	1,21	1,21	0,84
Pastagem	0,51	0,51	0,42	0,62	0,69	0,64	0,47	0,37	0,54	0,13	0,76	0,76	0,54
Silvicultura	0,65	0,82	0,71	0,97	1,15	1,16	0,93	0,82	0,96	0,64	1,15	1,03	0,92
Solo descoberto	0,26	0,23	0,26	0,28	0,32	0,30	0,25	0,20	0,24	0,01	0,53	0,62	0,29

Fonte: Imagem MYD09GA – MODIS/AQUA, 2013 - Organização dos autores.

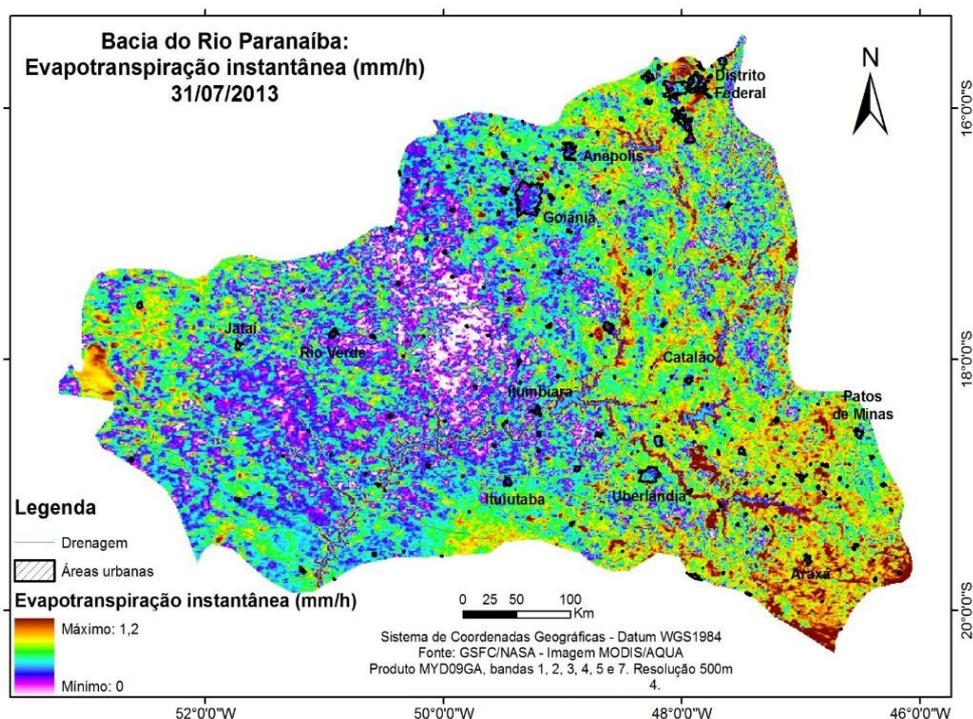


Figura 4 - Evapotranspiração real instantânea (mm/h) na bacia do Rio Paranaíba

Fonte: Organização dos autores.

Analisando as figuras 4 e 5, percebe-se que não existe diferença visual entre as estimativas dos dias 31 de julho e 02 de agosto, visto que o período é curto para mudanças nos padrões de evapotranspiração, sendo as diferenças mais significativas observadas ao comparar as médias registradas nos meses de verão (de novembro a abril) e nos meses de inverno (de maio a outubro).

Em mapeamento elaborado para imagens dos meses de outubro e novembro de 2004 para a região de Petrolina/PE, Nicácio (2008) aponta valores médios de E_{Th} próximos a 0,6 mm/h, embora trate de um período pós-chuvas no semi-árido e inclua áreas irrigadas. Bezerra, Silva e Ferreira

(2008), ao estimar a evapotranspiração real para a região de Juazeiro/CE com o SEBAL indicaram erro inferior a 10% após validação entre os dados estimados e aqueles medidos pela técnica da razão de Bowen, indicando valores médios de 0,64 mm/h considerando áreas de plantio em diferentes períodos do ano. Esses valores assemelham-se aos estimados para as áreas agrícolas da bacia do Rio Paranaíba, estando um pouco abaixo considerando-se as características climáticas de ambas as áreas de estudo.

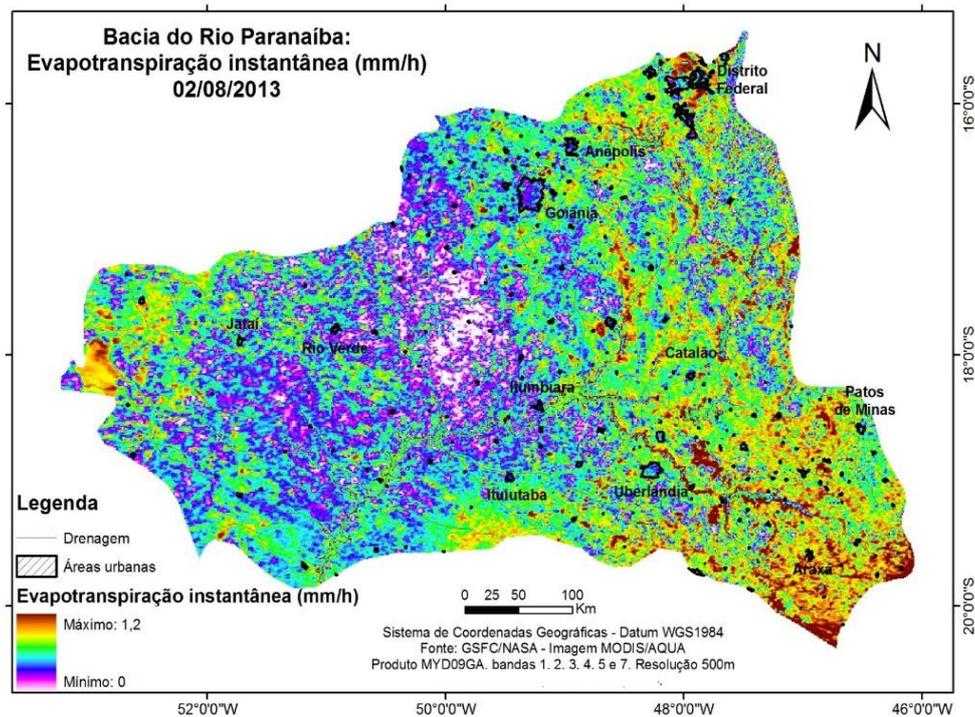


Figura 5 - Evapotranspiração real instantânea (mm/h) na bacia do Rio Paranaíba

Fonte: Organização dos autores.

Com os dados de evapotranspiração instantânea, juntamente com informações referentes à fração evaporativa no instante da passagem do satélite e a evapotranspiração de referência calculada de acordo com metodologia da FAO a partir dos dados climáticos registrados nas estações convencionais do INMET, foi realizada uma estimativa da evapotranspiração diária (mm/dia), informação importante, por exemplo, para o planejamento de aplicação de irrigação em lavouras. A variação espacial dessas informações pode ser melhor observada nos mapas das figuras 6 e 7.

O mapeamento de evapotranspiração diária, conforme tabela 2, apresentou valores médios de 3,4 mm/dia para o ano de 2013, sendo esses valores observados predominantemente em áreas de pastagens e cerrado aberto. Solos agrícolas em pousio e pastagens degradadas apresentaram valores inferiores a 2 mm/dia, chegando a índices próximos a 0 mm/dia em áreas de solo arenoso exposto.

Os maiores valores, assim como acontece com a evapotranspiração instantânea, foram registrados sobre os espelhos d'água, que chegaram a apresentar índices superiores a 10 mm/dia e

sobre as áreas de floresta estacional e de silvicultura, com índices de até 8 mm/dia. Regiões cobertas por lavouras apresentaram evapotranspiração diária média de 3 mm/dia, chegando a valores de 4,4 mm/dia. Considerando as imagens utilizadas na calibração dos modelos, foram registrados valores médios superiores a 5mm/dia para corpos hídricos e plantios florestais, enquanto que áreas de mata ciliar e residuais de florestas apresentaram médias entre 4 e 5mm. Áreas de cerrado e pastagens apresentaram índices muito semelhantes em todos os meses.

Tabela 2 - Valores médios de evapotranspiração real diária (mm/dia) por categoria de uso da terra e cobertura vegetal obtidos por tabulação cruzada para a Bacia do Rio Paranaíba (2013).

USO	18/1	14/2	14/3	17/4	01/5	13/6	31/7	02/8	26/9	10/10	26/11	04/12	MÉD
Água	5,27	5,82	4,52	5,89	5,15	4,57	5,67	5,08	7,95	5,91	7,56	6,51	5,83
Floresta	4,25	5,98	4,51	4,80	4,65	4,61	4,80	4,43	4,74	3,89	7,95	7,22	5,15
Silvicultura	4,25	5,63	4,56	5,97	5,25	4,73	5,76	5,05	6,25	4,86	7,65	6,09	5,50
Agricultura	4,27	4,97	3,18	5,09	4,43	3,71	3,42	2,83	4,92	2,15	7,83	6,45	4,44
Agricultura irrigada	3,80	5,11	3,18	4,60	4,25	3,12	4,27	3,70	4,27	2,40	6,90	5,29	4,24
Cerrado	3,58	3,72	2,93	4,10	4,04	2,74	4,22	3,71	4,25	2,12	5,96	5,31	3,89
Pastagem	3,53	3,79	2,86	4,03	3,07	2,32	3,06	2,64	3,98	0,98	5,19	5,08	3,38
Área urbana	2,51	1,45	1,86	1,90	2,38	1,57	2,68	2,26	2,92	0,35	4,83	4,35	2,42
Solo descoberto	2,37	1,89	1,07	2,02	2,16	0,91	1,65	0,95	1,03	0,08	3,75	3,85	1,81
Média geral	3,34	3,5	2,51	3,62	3,39	2,40	3,52	2,82	3,56	1,35	5,74	5,06	3,40

Fonte: Imagem MYD09GA – MODIS/AQUA, 2013. Organização dos autores.

No estudo de Nicácio (2008), utilizado como base de comparação, os valores médios de evapotranspiração diária para os meses de outubro e novembro ficaram próximos a 8,5 mm/dia, valores superiores aos encontrados nas estimativas realizadas para a bacia do Rio Paranaíba, mas que não apresentam-se tão significativos já que a área de estudo de Nicácio (2008) apresenta áreas de fruticultura irrigada.

Filgueira, Ribeiro e Rodrigues (2013), ao estimarem valores de evapotranspiração para a região Norte de Minas no dia 15 de setembro de 2010, encontraram valores médios de 2,51 mm/dia, com mínima de 0 mm/dia e máxima de 7,04 mm/dia. Considerando se tratar de uma região de transição para o semiárido, os resultados obtidos no estudo desenvolvido para a bacia do Rio Paranaíba estão coerentes, evidenciando a eficácia do modelo.

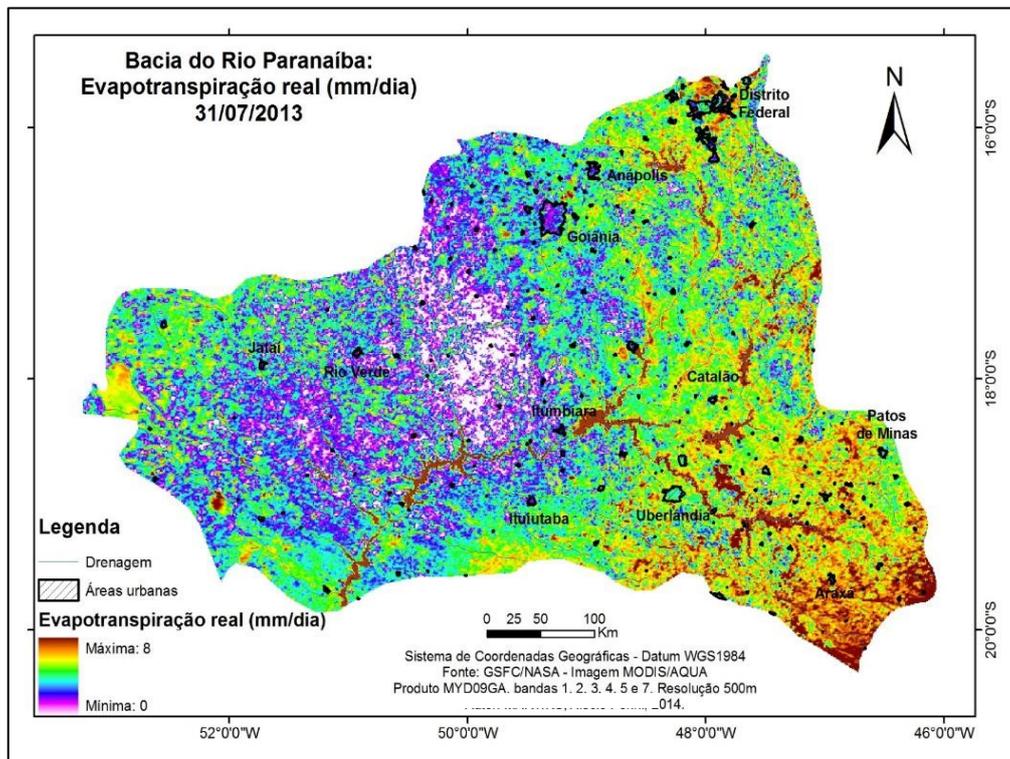


Figura 6 - Evapotranspiração real diária (mm/dia) na bacia do Rio Paranaíba
Fonte: Organização dos autores.

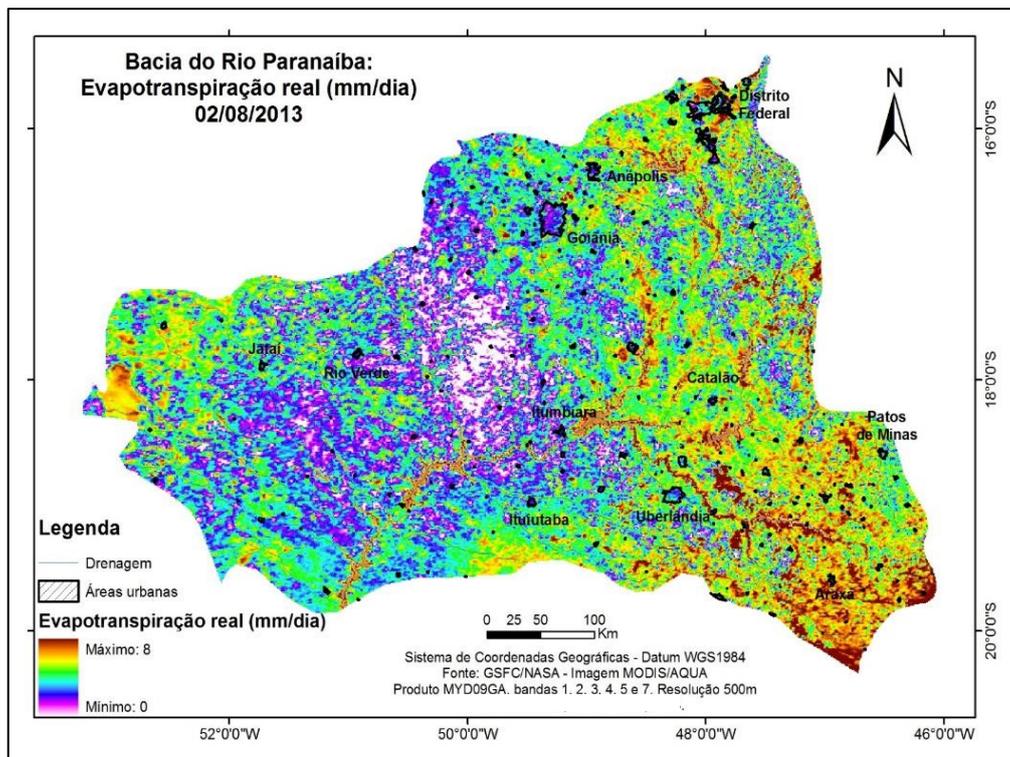


Figura 7 - Distribuição espacial da evapotranspiração real diária (mm/dia) na bacia do Rio Paranaíba
Fonte: Organização dos autores.

Lima et al. (2014) estimaram valores médios de 3,17mm/dia para o dia 23 de setembro em estudo de estimativa de evapotranspiração real na bacia do Rio Paracatu (MG) utilizando imagens do sensor MODIS/TERRA.

Ferreira e Meirelles (2011), ao estimarem valores de evapotranspiração real para o Sul do Estado e Goiás para o dia 06 de março de 2010, encontrando uma média de 1,57 mm/dia, bem abaixo do calculado neste estudo, que foi de 2,51 mm/dia para 14 de março de 2013.

Bezerra, Silva e Ferreira (2008) encontraram valores médios de 5,1 mm/dia para áreas agrícolas da região de Juazeiro do Norte/CE considerando imagens de diferentes períodos do ano, valores que também apresentam coerência com os encontrados na bacia do Rio Paranaíba, considerando as características climáticas de cada região. Segundo os autores, o erro médio fica na casa de 7% se comparados aos valores medidos pela técnica da razão de Bowen.

As áreas representadas por solos em pousio chegaram a apresentar valores próximos a 0 em outubro de 2013, auge do período seco, enquanto que, nessa mesma data, áreas cobertas por vegetação apresentaram índices superiores a 2mm/dia, chegando a 3,89 mm/dia em áreas com vegetação densa, evidenciando a importância dessas áreas para o ciclo hidrológico.

O gráfico da figura 8 fornece uma noção geral sobre o comportamento sazonal da evapotranspiração real (mm/dia) de acordo com cada categoria de uso da terra e cobertura vegetal. O que chama mais a atenção na figura é a diferença abrupta demonstrada entre as informações estimadas para 10 de outubro e 26 de novembro, marcando o início das chuvas na região e a reposição de água no solo.

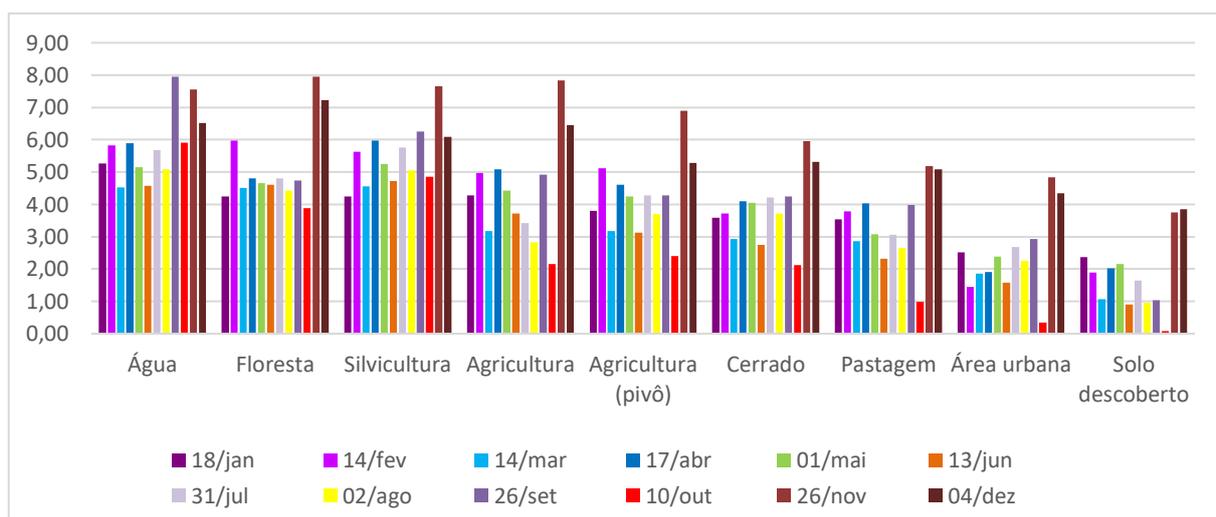


Figura 8 - Variação sazonal da evapotranspiração real média (mm/dia) estimada para diferentes usos das terras na bacia do Rio Paranaíba (2013).

Fonte: Organização dos autores.

Outra análise que pode ser feita é que os valores médios de ETr obtidos em superfície são, em média, 34% inferiores aos valores de referência calculados a partir dos registros climatológicos das estações convencionais do INMET pela metodologia da FAO. Esses valores de referência são calculados para áreas homogêneas, gramadas e com mínima interferência externa, correspondendo à

evapotranspiração potencial. Considerando as médias de ETp calculadas pela metodologia de Thornthwaite e Matter (1955), observa-se que o comportamento dos valores segue a mesma tendência, visto que, por esta metodologia, os valores médios de ETp anual apresentam-se 21% superiores aos valores de ETr.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Frente aos dados apresentados, considera-se que seja possível obter bons resultados de estimativa de evapotranspiração para áreas extensas, com pixels de 500 metros ou superiores, mas que para áreas menores ou com imagens de média/alta resolução espacial seriam necessárias análises mais pontuais, com medições de campo e dados horários de temperatura e velocidade dos ventos para uma calibração mais eficiente do modelo. Embora as informações aqui estimadas e mapeadas a partir de princípios matemáticos sejam importantes ferramentas de caracterização, análise e gestão ambiental para grandes bacias, ainda precisam ser aprofundadas, por exemplo, para auxiliar no planejamento e implementação de projetos de irrigação em áreas específicas do domínio tropical.

Apesar da margem de erro inferior a 10%, foram identificados alguns pontos problemáticos no modelo, principalmente, na estimativa do fluxo de calor sensível, que interfere diretamente na estimativa de evapotranspiração real. O modelo não considera dados relativos à textura e estrutura dos solos, bem como sua capacidade de armazenamento/perda de água em diferentes situações, o que acaba subestimando ou superestimando os resultados. Outra questão relevante é a pequena quantidade de estações climatológicas com registros consistentes sobre velocidade dos ventos, visto que é um elemento que não apresenta um padrão de comportamento espacial e a simples interpolação destas informações, além do trabalho com dados médios, pode prejudicar os resultados.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; WATERS, R.; BASTIAANSEN, W. **SEBAL** (Surface Energy Balance Algorithms for Land) advanced training and users manual – Idaho implementation. Idaho: Idaho University, USA, 2002. 98p.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Plano de recursos hídricos e do enquadramento dos corpos hídricos superficiais da bacia hidrográfica do Rio Paranaíba**. Brasília: ANA, 2013. 312p.

BASTIAANSEN, W. G. M., **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. 1995. 273 f. Tese (PhD), Wageningen Agricultural University, Wageningen: Netherlands, 1995.

BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F.; ROERINK, G. J.; DER WAL, T. V. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p. 213–229, 1998.

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat flux in the irrigated Gediz basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87–100. 2000.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM-Landsat5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.

FAO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. **ETo Calculator**. Manual (38p) e software Version 3.1. 2009. Land and Water Digital Media Series Nº 36.

FERREIRA, A. S.; MEIRELLES, M. S. P. Implementação preliminar do modelo SEBAL para estimativa de evapotranspiração na mesorregião Sul Goiano. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba/PR. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 5576-5583.

FILGUEIRAS, R.; RIBEIRO, R. B.; RODRIGUES, C. N. Estimativa da evapotranspiração a partir de imagens do sensor MODIS aplicadas à região norte de Minas Gerais. **Enciclopédia Biosfera – Centro Científico Conhecer**, v. 09, n. 16, p. 1067-1078, 2013.

LIMA, E. P.; SEDIYAMA, G. C.; ANDRADE, R. G.; LOPES, V. D.; SILVA, B. B. Evapotranspiração real diária em sub-bacias do Rio Paracatu, utilizando produtos do sensor MODIS. **Revista Ceres**, v. 61, n. 01, p. 17-27, 2014.

MANNING, J. C. **Applied principles of hydrology**. 2. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1997. 276p.

MODIS. **Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer**. Disponível em <http://modis.gsfc.nasa.gov>. Acesso em: 15 ago. 2014.

MOREIRA, L. C. J. DURAND, B. J.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 06, p. 1148-1159, 2010.

MRTWEB, MODIS Reprojection Tool Web Interface. **Enhanced MODIS data discovery and delivery services from the LP DAAC**. Disponível em: <http://www.mrtweb.cr.usgs.gov>. Acesso em: 15 ago. 2014.

NICÁCIO, R. M. **Evapotranspiração real e umidade do solo usando dados de sensores orbitais e a metodologia SEBAL na bacia do Rio São Francisco**. 2008. 337 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ROSA, R.; SANO, E. E. Uso da Terra e Cobertura Vegetal na Bacia do Rio Paranaíba. **Campo-Território: revista de geografia agrária**, v. 09, n. 19, p. 32-56, 2014.

SOARES, J.V.; BATISTA, G.T.; SHIMABUKURO, Y.E. Histórico e Descrição. In: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. (Org.). **O Sensor MODIS e suas aplicações no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. p. 1-22.

Trabalho enviado em 03/01/2019

Trabalho aceito em 28/02/2019