

Determinação da evapotranspiração através de imagens de satélites de diferentes resoluções com e sem a banda termal

Antônio Heriberto de Castro Teixeira¹

Janice Freitas Leivas¹

Ricardo Guimarães Andrade¹

Fernando Braz Tangerino Hernandez²

¹ Embrapa Monitoramento por Satélite - CNPM/Embrapa

CEP - 13070-115 - Campinas - SP, Brasil

{heriberto.teixeira, ricardo.andrade, janice.leivas }@embrapa.br

² Universidade Estadual Paulista – UNESP

fbhtang@agr.feis.unesp.br

Abstract. For evapotranspiration (ET) analyses under different spatial resolutions, MODIS, Landsat and RapidEye images together with a net of agrometeorological stations were used throughout application of the SAFER (Surface Algorithm For Evapotranspiration Retrieving) algorithm during the driest period in the Brazilian Semiarid region. A new methodology from which the surface temperature is derived as a residual in the radiation balance was tested. After comparing Landsat and MODIS ET results with and without the thermal band, and having confidence on this method, it was applied with the RapidEye image. The mean ET for the mixed agro-ecosystems was 0.6 ± 1.2 mm day⁻¹ and 0.7 ± 1.3 mm day⁻¹ in the left and right banks of the São Francisco River, being 67% and 46% of those for Landsat and MODIS images. The results evidenced that as lower is the satellite resolution, higher underestimation of irrigated area will occur, promoting small ET values. The current research opens the room for the use of high-resolution satellite images without the thermal band in water resources management.

Palavras-chave: remote sensing, energy balance, agrometeorological stations, sensoriamento remoto, balanço de energia, estações agrometeorológicas.

1. Introdução

Para as modelagens hídrica e agrícola, torna-se importante que a evapotranspiração (ET) seja obtida com elevada frequência temporal, para a incorporação de sua dinâmica ao longo do tempo, já que esta é função da umidade do solo da demanda atmosférica. O percentual da ET, em relação ao total de água precipitado, varia consideravelmente entre os diferentes biomas (Falkemak e Rockström, 2005). As dificuldades de obtenção da ET em ecossistemas mistos através de medições de campo fizeram do sensoriamento remoto por imagens de satélites uma ferramenta poderosa, a qual vem sendo utilizada em diferentes regiões climáticas e resoluções espaciais (Teixeira et al., 2014a,b).

Na utilização de imagens de satélites para determinação da ET, geralmente a banda termal dos sensores é utilizada para a obtenção da temperatura da superfície (T_s). Entretanto, devido a importância de boas resoluções temporais e espaciais para a captura da dinâmica da vegetação ao longo do tempo, a baixa resolução espacial resulta em limitações em algumas aplicações, tais como na modelagem dos componentes do balanço hídrico.

As imagens de satélite mais utilizadas para a modelagem hidrológica envolvem os sensores termais de média resolução espacial e baixa resolução temporal (ETM, ASTER); ou de baixa resolução espacial e alta resolução temporal (MODIS, AVHRR). Para contornar este problema algumas técnicas têm sido utilizadas, como interpolações temporais e de desagregação espacial (Chemin e Alexandritis, 2004).

Os satélites RapidEye, apesar de não apresentarem a banda termal, com a resolução espacial de 5m, oferecem imagens com uma larga área de cobertura, com intervalos de revisita frequentes, alta resolução e capacidades multiespectrais. Há uma constelação de cinco

satélites que contém sensores idênticos no mesmo plano orbital e calibrados igualmente entre si.

O objetivo do presente artigo é testar a aplicação de uma nova metodologia de obtenção da evapotranspiração com a temperatura da superfície obtida com ou sem a banda termal com satélites MODIS e Landsat e posterior aplicação com sensores RapidEye, para ver a viabilidade de utilização deste último satélite no monitoramento da ET em agros-ecossistemas envolvendo culturas irrigadas e vegetação natural tomando-se como referência a região semiárida brasileira.

2. Material de Trabalho

A Figura 1 apresenta a localização das nove estações agrometeorológicas utilizadas, juntamente com as regiões consideradas nos municípios de Petrolina e Juazeiro, respectivamente nos estados de Pernambuco (PE) e Bahia (BA) no Nordeste do Brasil.

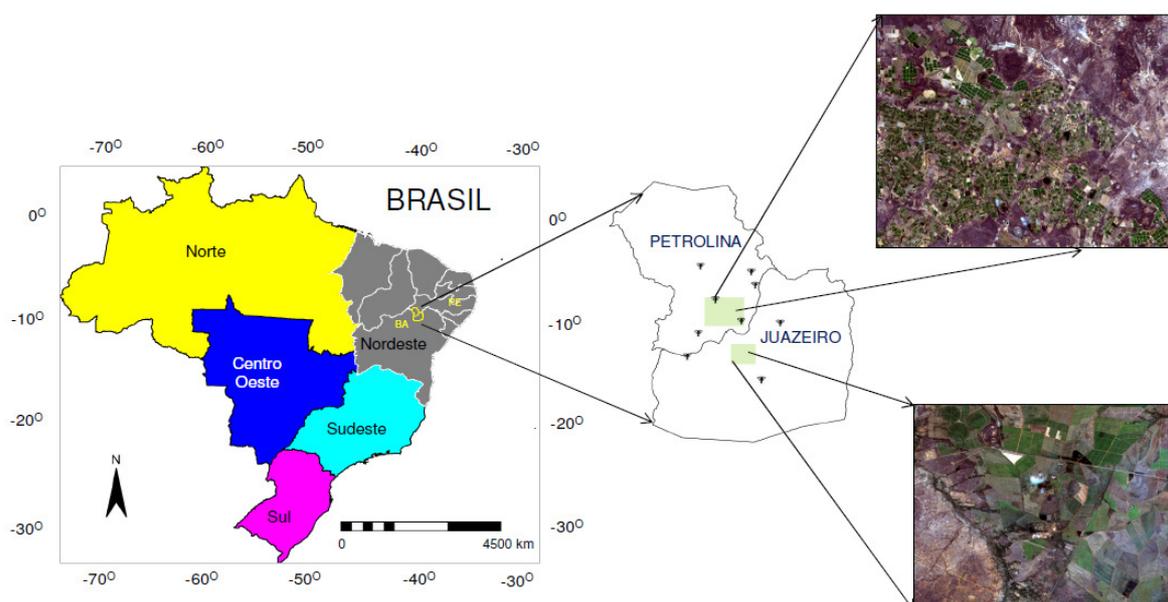


Figura 1. Localização das estações agrometeorológicas utilizadas no processo de interpolação dos dados climáticos em Petrolina, Estado de Pernambuco (PE) e Juazeiro, Estado da Bahia (BA), ambos situados no Nordeste do Brasil.

Imagens dos satélites MODIS, Landsat 5, e RapidEye, envolvendo diferentes agros-ecossistemas, foram usadas para o período mais seco do ano, respectivamente nos dias 19/08/2011, 29/08/2011 e 10/09/2011. Como não houve disponibilidade de imagens dos diferentes sensores para o mesmo dia do ano (DA), aqueles referentes às passagens do Landsat e do MODIS foram normalizadas através de dados de radiação solar global (R_G) para o albedo, evapotranspiração de referência (ET_0) para a ET e albedo da superfície (α_0) para o NDVI e temperatura do ar (T_a) para T_s , para o dia de aquisição da imagem RapidEye, visando comparação dos resultados sob condições de demanda atmosféricas similares.

Para o cálculo da evapotranspiração (ET) com ou sem a banda termal, o algoritmo SAFER – *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* (Teixeira et al., 2014a,b) foi aplicado nos recortes considerando-se a grande ocorrência de áreas irrigadas circundadas por vegetação natural, nas margens esquerda e direita do Rio São Francisco (ver Figura 1). Os parâmetros de entrada são α_0 , a temperatura da superfície (T_s) e o Índice da Diferença de Vegetação Normalizado (NDVI), os quais foram usados com grades de parâmetros climáticos.

Com as imagens Landsat e RapidEye, α_0 foi calculado da seguinte forma:

$$\alpha_{p_{band}} = \frac{L_{band} \pi d^2}{R_{a_{band}} \cos \varphi} \quad (1)$$

onde L_{band} é a radiação espectral para os comprimentos de onda de cada banda, d é distância relativa Terra-Sol; $R_{a_{band}}$ é a irradiância solar média no topo da atmosfera para cada banda ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$) e φ é o ângulo zenital solar.

α_p é calculado como a média ponderada de $\alpha_{p_{band}}$ de acordo com o peso de cada banda (w_{band}) (Teixeira et al., 2014a):

$$\alpha_p = \sum w_{band} \alpha_{p_{band}} \quad (2)$$

As bandas 1 a 5 e 7 do Landsat e de 1 a 5 do RapidEye, foram usadas para o cômputo de α_p .

Para o MODIS, o modelo linear a seguir foi utilizado:

$$\alpha_0 = a + b\alpha_1 + c\alpha_2 \quad (3)$$

onde α_1 e α_2 são as reflectâncias nas bandas 1 e 2 e a e b são coeficientes de regressão (Teixeira et al., 2014b).

Com o uso da banda termal para o Landsat e o MODIS, a temperatura de brilho (T_b) foi estimada pela equação de Plank como segue

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_T + 1}\right)} \quad (4)$$

onde L_T é a radiação termal não corrigida para a banda 6 do Landsat e bandas 31 e 32 do MODIS, sendo K_1 e K_2 coeficientes de conversão dependente do tipo de satélite.

Para o sensor MODIS a temperatura da superfície foi estimada com a seguinte equação (Teixeira et al., 2014b):

$$T_s = dT_{31} + f\alpha_{32} \quad (5)$$

onde T_{31} e T_{32} são as temperaturas de brilho para as bandas 31 e 32 e d e f são coeficientes de regressão igualmente 0,50.

Para os três tipos de satélites, a temperatura da superfície (T_0) foi também obtida por resíduo na equação do balanço de radiação (Teixeira et al., 2004a,b):

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{R_G - \alpha_0 R_G + \epsilon_A \sigma T_a^4 - R_n}{\epsilon_S \sigma}} \quad (6)$$

onde R_G e T_a são respectivamente os valores diários da radiação solar global incidente e a temperatura média do ar provenientes das estações agrometeorológicas, R_n é o saldo de radiação diário, ϵ_A e ϵ_S são as emissividades da atmosfera e da superfície, respectivamente.

ϵ_A e ϵ_S foram calculadas como segue (Teixeira et al., 2014a,b):

$$\epsilon_A = a_A + (\ln \tau_s)^{b_A} \quad (7)$$

$$\epsilon_S = a_S \ln NDVI + b_S \quad (8)$$

onde τ_{sw} é a transmissividade para ondas curtas, e a_A , b_A , a_S e b_S são os coeficientes de regressão (Teixeira et al., 2014a)

Os valores diários de R_n foram obtidos pela equação de Slob:

$$R_n = (1 - \alpha_0) R_G - a_L \tau_{sw} \quad (9)$$

onde a_L é um coeficiente de regressão da relação entre o saldo de radiação de ondas longas e τ_{sw} na escala diária. Este coeficiente foi especializado de acordo com os valores de T_a (Teixeira et al., 2014a,b).

O algoritmo SAFER foi usado para modelagem dos valores instantâneos da razão da ET para a evapotranspiração de referência (ET_0), a qual multiplicada pelos valores diários da ET_0 das estações agrometeorológicas fornecem a ET em larga escala.

$$\frac{ET}{ET_0} = \left\{ \exp \left[g + h \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \right\} \quad (10)$$

onde ET_0 é calculada pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) e g e h são os coeficientes de regressão (Teixeira et al., 2014a,b).

3. Resultados e Discussão

A Tabela 1 apresenta os dados climáticos para os dias do ano (DA) 231, 241 e 253, de aquisição imagens MODIS, Landsat 5, e RapidEye, registrados em estações mais próximas das áreas em verde na Figura 1, nos municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA).

Tabela 1. Dados climáticos para os dias do ano (DA) 231, 241 e 253, de aquisição das imagens MODIS, Landsat 5, e RapidEye, nos municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA): Radiação solar global (R_G), temperatura do ar (T_a), umidade relativa (UR), velocidade do vento (u) e evapotranspiração de referência (ET_0).

(b) Dados climáticos em Petrolina-PE						
Data/DA	DA	R_G (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	T_a (°C)	UR (%)	u (m s ⁻¹)	ET_0 (mm dia ⁻¹)
19/08/2011	231	27,9	23,9	53	2,3	5,7
29/08/2011	241	27,5	24,9	55	2,9	6,4
10/09/2011	253	29,5	25,6	51	2,6	6,6

(b) Dados climáticos em Juazeiro-BA						
Data/DA	DA	R_G (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	T_a (°C)	UR (%)	u (m s ⁻¹)	ET_0 (mm dia ⁻¹)
19/08/2011	231	24,4	25,1	46	2,0	6,1
29/08/2011	241	24,0	25,4	50	2,6	6,6
10/09/2011	253	24,8	26,2	46	2,7	7,3

Apesar de Petrolina-PE apresentar maiores valores de R_G que em Juazeiro-BA nos dias de aquisição das imagens, as taxas de ET_0 são menores no primeiro município, devido à advecção de umidade proveniente do Rio São Francisco para a sua margem direita, o que pode ser comprovado pelos maiores valores de umidade relativa com similares valores de velocidade do vento (u).

Como as imagens foram adquiridas em dias diferentes os resultados para α_0 , T_0 , NDVI e ET para os dias 231 e 241 foram normalizados para o dia 253 através da multiplicação das grades das razões da R_G , T_a e ET_0 , permitindo uma comparação entre os resultados com as diferentes imagens.

A Figura 2 apresenta a distribuição espacial dos valores normalizados de α_0 e NDVI para os satélites Landsat e MODIS em agros-ecossistemas mistos dos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, Nordeste do Brasil.

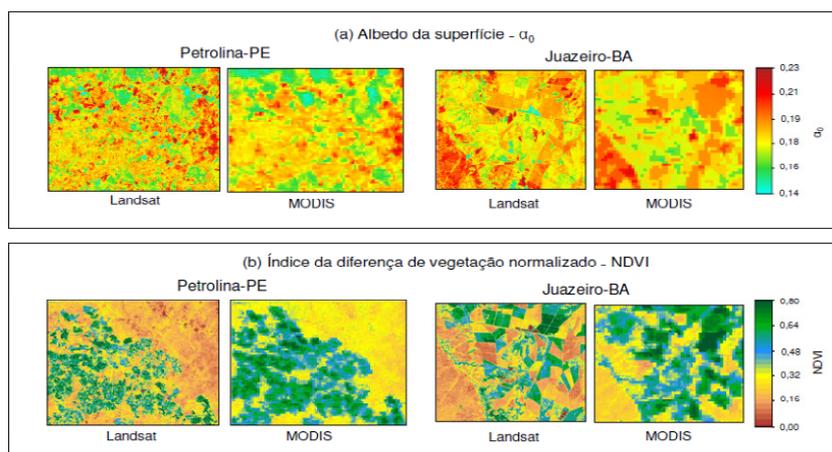


Figura 2. Distribuição espacial de parâmetros biofísicos com imagens Landsat e MODIS em diferentes agros-ecossistemas do município de Petrolina-PE, Brasil. (a) albedo da superfície (α_0) (b) Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI).

O balanço de radiação entre os diferentes tipos de vegetação é fortemente afetado por α_0 . Na Figura 2a os menores valores são para condições de irrigação, o que está de acordo com Li et al. (2006). Entretanto percebe-se claramente uma área maior com estes baixos valores com imagens MODIS, com médias de $0,18 \pm 0,01$ em relação aos resultados provenientes do Landsat, cerca de $0,18 \pm 0,02$ em ambos Petrolina-PE e Juazeiro-BA.

Com relação ao NDVI (Figura 2b), as imagens MODIS apresentaram médias de $0,43 \pm 0,16$ e $0,45 \pm 0,17$ respectivamente em Petrolina-PE e Juazeiro-BA. Os valores correspondentes para Landsat foram $0,32 \pm 0,19$ e $0,25 \pm 0,21$. Percebe-se portanto que o NDVI é mais sensível a variação das condições hídricas e de vegetação que α_0 e que as estimativas com imagem MODIS superestimam este parâmetro de 30 a 80% devido a uma resolução de 250m contra a de 30m do satélite Landsat.

As distribuições espaciais da T_s calculada pelas equações 4 a 6 nas escalas de tempo da passagem dos satélites (T_{s_inst}) e diária (T_{s_24}) são mostradas na Figura 3 nos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA.

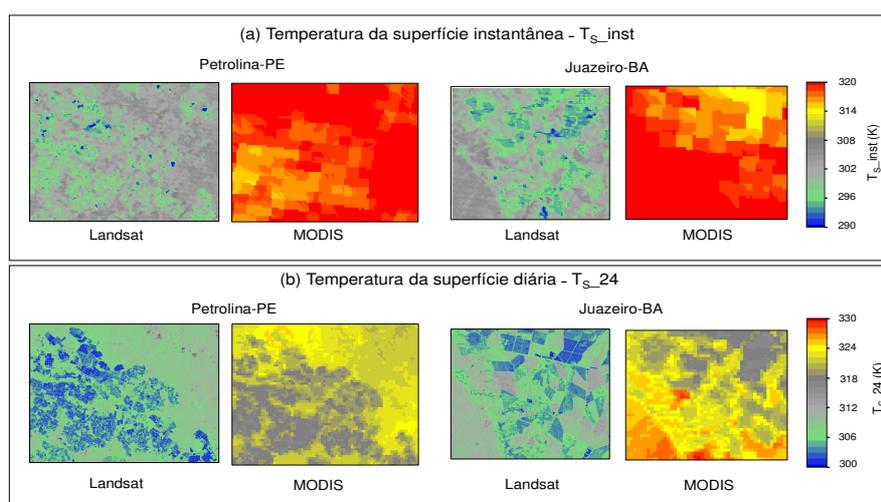


Figura 3. Distribuição espacial da temperatura da superfície (T_s) com imagens Landsat e MODIS em diferentes agros-ecossistemas dos municípios de Petrolina-PE, Nordeste do Brasil. (a) no momento da passagem dos satélites (T_{s_inst}) (b) na escala diária (T_{s_24}).

T_s afeta a energia disponível interferindo no balanço de radiação de ondas longas com menores valores em áreas irrigadas e maiores naquelas mais secas. Observando-se os resultados para o momento da passagem dos satélites percebe-se que este parâmetro não distingue tão bem as culturas irrigadas como no caso do NDVI, quando obtida pela lei de Plank (Figura 3a), usando-se as bandas termiais dos satélites Landsat e MODIS, com respectivas resoluções de 120 e 1000 m. Com a estimativa de T_s por resíduo na equação do balanço de radiação as resoluções espaciais caem para 30 e 250m, respectivamente.

Os valores médios de T_{s_inst} obtidos com imagens MODIS foram de $319,3 \pm 1,9$ K e $319,8 \pm 3,2$ K em Petrolina-PE e Juazeiro-BA, respectivamente e de $301,3 \pm 2,9$ e $300,0 \pm 3,6$ K com imagens Landsat. Estas diferenças representam superestimativas de 6 e 7% o que afeta bastante a ET em larga escala com uma maior emissão de ondas longas detectadas pelo sensor MODIS na resolução de 1000m.

Observando-se os valores de T_{s_24} (Figura 3b), percebem-se com maior clareza as culturas irrigadas da vegetação natural. Neste caso com a resolução de 30 m, os valores com o Landsat ($306,8 \pm 2,8$ K e $307,6 \pm 3,0$ K para Petrolina-PE e Juazeiro-BA, respectivamente) representaram 95 % daqueles resultantes das imagens MODIS ($320,7 \pm 1,9$ K e $322,4 \pm 2,8$ K para Petrolina-PE e Juazeiro-BA, respectivamente) com resolução espacial de 250 m.

Além da melhoria da resolução dos resultados com a Equação 6, esta metodologia fornece espaço à obtenção da ET através de satélites com alta resolução espacial que não possuem a banda termial, como no caso de RapidEye que apresenta uma resolução espacial de 5m. A Figura 4 apresenta a distribuição espacial dos parâmetros de entrada no SAFER para este último satélite.

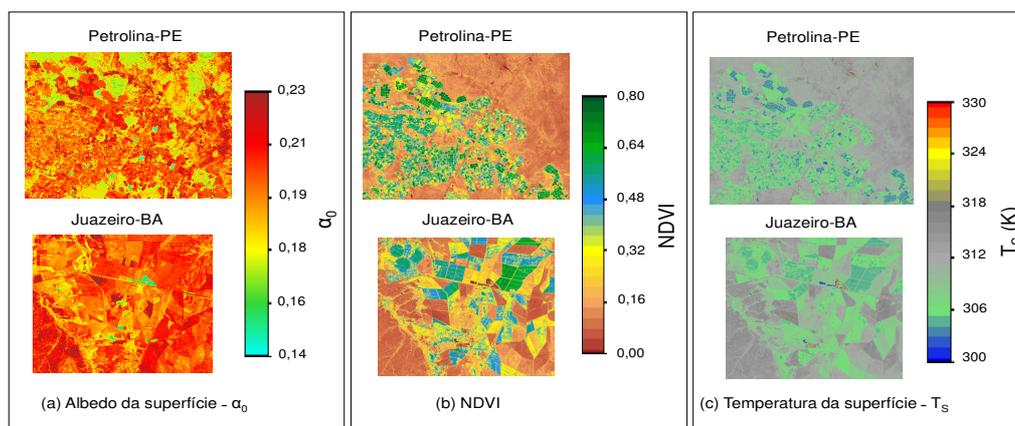


Figura 4. Distribuição espacial dos parâmetros de entrada no SAFER, com imagens RapidEye em diferentes agros-ecossistemas do município de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, Nordeste do Brasil. (a) albedo da superfície (α_0); (b) temperatura da superfície (T_s); e Índice da Diferença de Vegetação Normalizado (NDVI).

Com o uso das imagens os valores de α_0 entre os diferentes agros-ecossistemas ficaram mais evidentes (Figura 4a) entretanto 6% mais elevados com relação as imagens Landsat e MODIS, apresentando médias de $0,19 \pm 0,02$ e $0,18 \pm 0,01$ nos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA. Os valores de NDVI (Figura 4b) ficam bem distintos considerando-se as diferenças de biomassa entre as culturas irrigadas e vegetação natural, com médias de 0,24 em ambos os municípios, mas com desvios padrões de 0,18 e 0,16 em Petrolina-PE e Juazeiro-BA, respectivamente. Constata-se portanto uma diferença em torno de 80 a 90% em relação ao sensor MODIS. Efeito notável é na distribuição espacial de T_s (Figura 4c), onde claramente se distingue as culturas irrigadas pelos menores valores com relação a vegetação natural. Comparando-se os valores médios ($310,2 \pm 3,3$ e $310,5 \pm 3,6$ K em Petrolina-PE e

Juazeiro-BA, respectivamente) para 24 horas com aqueles provenientes dos sensores MODIS e Landsat, estes se apresentam respectivamente maiores e menores.

As diferenças nos parâmetros de entrada do SAFER provenientes de diferentes resoluções espaciais irão portanto afetar os balanços de radiação e energia e conseqüentemente os valores da ET, os quais são apresentados na Figura 5 provenientes dos satélites Landsat e MODIS, estimada com e sem a banda termal.

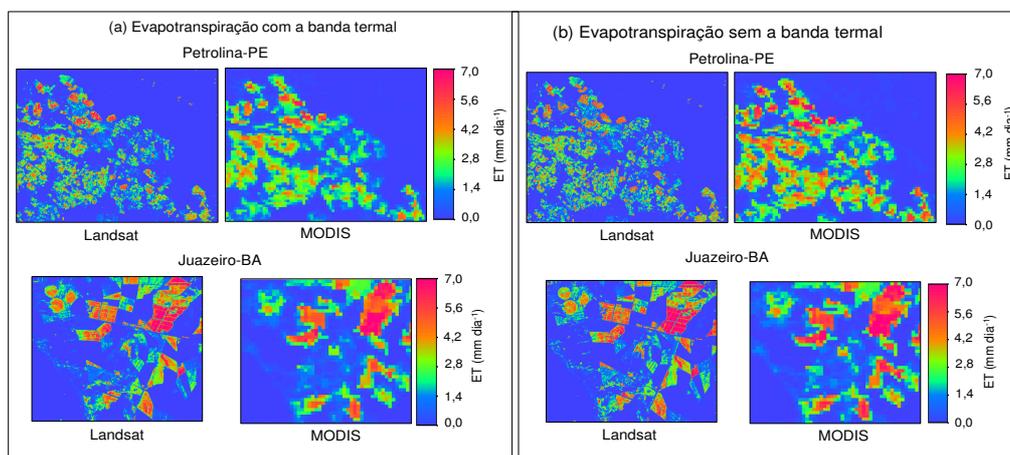


Figura 5. Distribuição espacial da evapotranspiração (ET) com imagens Landsat e MODIS em diferentes agros-ecossistemas do município de Petrolina-PE, Nordeste do Brasil. (a) com a banda termal (b) sem a banda termal.

Pela Figura 5 percebe-se a similaridade nos padrões dos valores espaciais da ET obtida com e sem a banda termal. Entretanto enquanto os valores médios para o satélite Landsat foram em torno de $0,8 \pm 1,3 \text{ mm dia}^{-1}$ e $1,1 \pm 1,8 \text{ mm dia}^{-1}$, em Petrolina-PE e Juazeiro-BA respectivamente, com e sem a banda termal mostrando uma compensação nas diferenças dos parâmetros de entrada do SAFER, com relação ao MODIS os valores correspondentes foram de $1,3 \pm 1,8$ e de $1,4 \pm 1,9 \text{ mm dia}^{-1}$ evidenciaram um ligeiro aumento quando se dispensa a banda termal de 120 km para o uso das bandas com resolução de 250 m.

A similaridade dos resultados da ET com e sem a banda termal fornecem confiança da metodologia com o uso conjunto de estações agrometeorológicas e imagens de alta resolução de satélites desprovidos da banda termal. A Figura 6 apresenta a distribuição espacial da ET com o sensor RapidEye.

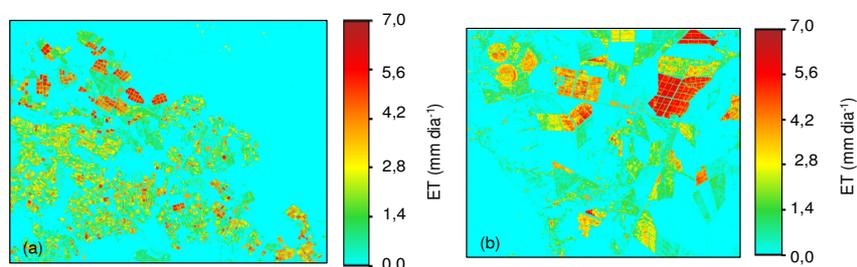


Figura 6. Distribuição espacial da evapotranspiração (ET), com imagens RapidEye em diferentes agros-ecossistemas dos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, Nordeste do Brasil.

A variação espacial da ET apresentada na Figura 6 é evidente nas imagens RapidEye adquiridas no período mais seco do ano no semiárido brasileiro. Elevadas porções da energia disponível são usadas com fluxo de calor sensível na vegetação natural, a qual apresenta taxas

da ET próximo de zero, enquanto que nas áreas irrigadas esta usada para a ET, com valores acima de $6,0 \text{ mm dia}^{-1}$ representando culturas bem irrigadas, principalmente parreirais e mangueiras nas margens esquerda (Petrolina-PE) e direita (Juazeiro-BA) do Rio São Francisco.

Os valores médios de $0,6 \pm 1,2 \text{ mm dia}^{-1}$ e $0,7 \text{ mm dia}^{-1}$ em Petrolina-PE e Juazeiro-BA, respectivamente, foram 67% daquele obtido com satélite Landsat e aproximadamente 46% daquele obtido com imagens MODIS, evidenciando que quanto menor a resolução espacial do satélite, uma maior subestimativa da área irrigada acarretará numa estimativa de menores valores da ET.

3. Conclusões

O algoritmo SAFER foi aplicado em satélites de diferentes resoluções espaciais com e sem a banda termal, para se demonstrar a aplicabilidade de estimativa da evapotranspiração com uma nova metodologia a qual estima a temperatura da superfície como resíduo no balanço de energia em larga escala.

As incertezas nos resultados das imagens MODIS, comparadas com as imagens Landsat, são causadas principalmente pelo uso da banda termal de 1000 km do primeiro satélite, em contraste com a resolução de 120 m da banda termal do segundo satélite. Como resultado da mais baixa resolução, mais pixels cobrem uma grande mistura de classes de uso da terra, reduzindo a precisão espacial da evapotranspiração.

Após a utilização das imagens RapidEye, os resultados indicaram taxas de evapotranspiração de 67% daquele obtido com satélite Landsat e aproximadamente 46% do resultado obtido com imagens MODIS, o que abre o campo para a utilização de imagens de alta resoluções espaciais e temporais no manejo dos recursos hídricos.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pelo aporte financeiro referente a projetos sobre produtividade da água.

Referências bibliográficas

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**, Rome, Italy, 300 pp, 1998.
- Chemin, B. J.; Alexandris, T. Improving spatial resolution of ET seasonal for irrigated rice in Zhanghe, China. **Asian Journal in Geoinformatics**, v. 5, p. 3-11, 2004.
- Falkenmark, M.; Rockström, J. **Balance water for humans and nature**. Londres: Earthscan, 2 ed., 2005, 247 p.
- Li, S.-G.; Eugster, W.; Asanuma, J; Kotani, A.; Davaa, G.; Oyunbaatar, D.; Sugita, M. Energy partitioning and its biophysical controls above a grazing steppe in central Mongólia. **Agricultural Forest Meteorology**, v. 137, p. 89-106, 2006.
- Teixeira, A. H. de C.; Hernandez, F.B.T.; Andrade, R.G. ; Leivas, J.F. ; Bolfe, E.L. . Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots with corn crop in the São Paulo State, Brazil. **Proceedings of SPIE - International Society for Optical Engineering**, v. 9239, p. 923900-1-923900-10, 2014a.
- Teixeira, A. H. de C.; Victoria, D. de C.; Andrade, R.G. ; Leivas, J.F. ; Bolfe, E.L. ; Cruz, C.R. Coupling MODIS images and agrometeorological data for agricultural water productivity analyses in the Mato Grosso state, Brazil. **Proceedings of SPIE - International Society for Optical Engineering**, v. 9239, p. 92390W-1-92390W-14, 2014b.