

Evapotranspiração real utilizando a fração de referência na região semi-árida da bacia hidrográfica do rio São Francisco

Rosilene Mendonça Nicácio¹
Otto Corrêa Rotunno Filho²
Gutemberg Borges França²
Célia Maria Paiva²
Michely Libos³

¹ Universidade Federal de Alagoas – UFAL/IGEDEMA
Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro dos Martins - 57072-970 - Maceió - AL, Brasil
rmonicacio@gmail.com

² Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/PEC/IGEO
Centro de Tecnologia, Bloco I, Sala 106, Ilha do Fundão - 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
ottorotunno@oi.com.br; {celia, gutemberg}@lma.ufrj.br

³ CEFET Campos UNED Guarus
Av. Souza Motta, 350 - Parque Fundão - Campos dos Goytacazes - RJ, Brasil
mlibos@yahoo.com.br

Abstract. The availability of data from evapotranspiration on a regional scale is important with regard to rainfall-runoff models and to weather and climate models. These models are essential in activities such as those conducted by the National Electrical System Operator (ONS). Under this framework, this research work focuses on the estimation of daily actual evapotranspiration in the region of Petrolina/Juazeiro. The algorithm SEBAL (Surface Energy Balance for Land) was used. The SEBAL requires visible, near infrared and thermal infrared data, which were obtained of the TM - Landsat 5 sensor, and limited input data from the field (air temperature and wind velocity). Therefore in this work were utilized more data meteorological due to the calculation of reference evapotranspiration (FAO 56 method). The results showed both the complexity of the spatial distribution of daily actual evapotranspiration and concordance with results found in the literature. The spatial variability of the actual evapotranspiration showed consistency with the land use and land cover dataset while the temporal variability is associated with the occurrence of the rainfall. The spatial distribution of rainfall was responsible for different responses in the partitioning of energy and radiation flux that allowed spatial variations in daily actual evapotranspiration. These results show that spectral data of remote sensing associated with data from field allow the coherent estimation of daily actual evapotranspiration.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, actual evapotranspiration, SEBAL, TM sensor, sensoriamento remoto, processamento de imagem, evapotranspiração real, SEBAL, sensor TM.

1. Introdução

No Brasil, as questões voltadas ao gerenciamento hídrico de uma bacia hidrográfica tornaram-se um desafio examinado predominantemente sob o aspecto socioeconômico. No entanto, responder essas questões não é uma tarefa trivial, uma vez que a disponibilidade hídrica guarda uma estreita relação com as diversas componentes climáticas que atuam concomitantemente. Gestões hídricas eficazes requerem um bom entendimento dos processos de superfície. Para Mohamed *et al.* (2004), estimativas da variação espaço-temporal dos fluxos energéticos à superfície e da umidade do solo viabilizariam o entendimento dos processos evaporativos, fundamentais em muitas aplicações que enfocam recursos hídricos e modelagem climática.

A despeito disso, as medições meteorológicas, relevantes no monitoramento dos recursos hídricos, são realizadas durante experimentos, sendo limitadas no tempo e espaço. Acrescente-se que, quando da existência de medições diretas ou informações que possibilitem a estimativa da evapotranspiração real (ET real), em geral, o que se tem é uma representação temporal dessa variável, o que não permite o conhecimento efetivo de seu padrão espacial em uma dada região.

Por essa razão, o monitoramento espacial e contínuo da ET real em uma bacia hidrográfica, ainda não está disponível. Essa lacuna se deve à complexidade do sistema físico envolvido e ao fato de que os

métodos convencionais de avaliação sobre grandes áreas requerem um extensivo sistema de medidas meteorológicas. As metodologias tradicionais para a estimativa da ET real, além de demandarem dados não obtidos corriqueiramente, falham na sua representatividade espacial, a despeito da boa precisão quando o que se deseja são informações pontuais ou representativas de pequenas áreas (Bastiaanssen, 2000).

Com essas limitações, tornou-se indispensável a utilização de técnicas alternativas que permitam a estimativa da ET real. Vários trabalhos envolvendo a estimativa de fluxos de energia e da ET real através do sensoriamento remoto podem ser encontrados na literatura (Bastiaanssen *et al.*, 1998b; Olioso *et al.*, 1999; Trezza, 2002; Tasumi, 2003; Allen *et al.*, 2007).

O SEBAL (*Surface Energy Balance for Land*) é um dos mais destacados algoritmos para estudos da ET real, e vem sendo utilizado por vários pesquisadores (Bastiaanssen *et al.*, 1998b; Bastiaanssen, 2000; Tasumi *et al.*, 2005; Paiva, 2005; Folhes, 2007; Nicácio, 2008). O SEBAL utiliza imagens de satélites e poucas informações de superfície, tais como temperatura do ar e velocidade do vento. O autor propõe o emprego de poucas relações e suposições empíricas que se relacionam às questões de estimativas do fluxo de calor no solo, da emissividade da superfície e dos parâmetros de rugosidade aerodinâmica para o transporte de calor.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo a estimativa da evapotranspiração real diária utilizando o algoritmo SEBAL e a evapotranspiração de referência (FAO-56) na região semi-árida da bacia do rio São Francisco, especialmente na área envolvendo o pólo de fruticultura Petrolina/Juazeiro.

2. Materiais e Métodos

2.1. Localização da área de estudo

A região de interesse nesta pesquisa envolve parte dos municípios de Petrolina-PE, Juazeiro-BA, Casa Nova-BA e Lagoa Grande-PE (ver Figura 1), que se insere no semi-árido da bacia do rio São Francisco. Doravante a região de estudo será chamada de Petrolina/Juazeiro. A vegetação predominante nessa região é a savana estépica. A região Petrolina/Juazeiro tem se destacado no contexto nacional pela produção de frutas tropicais, mas a despeito disso, essa área se insere no Polígono das Secas, sendo, portanto, sujeita a períodos críticos de prolongadas estiagens.

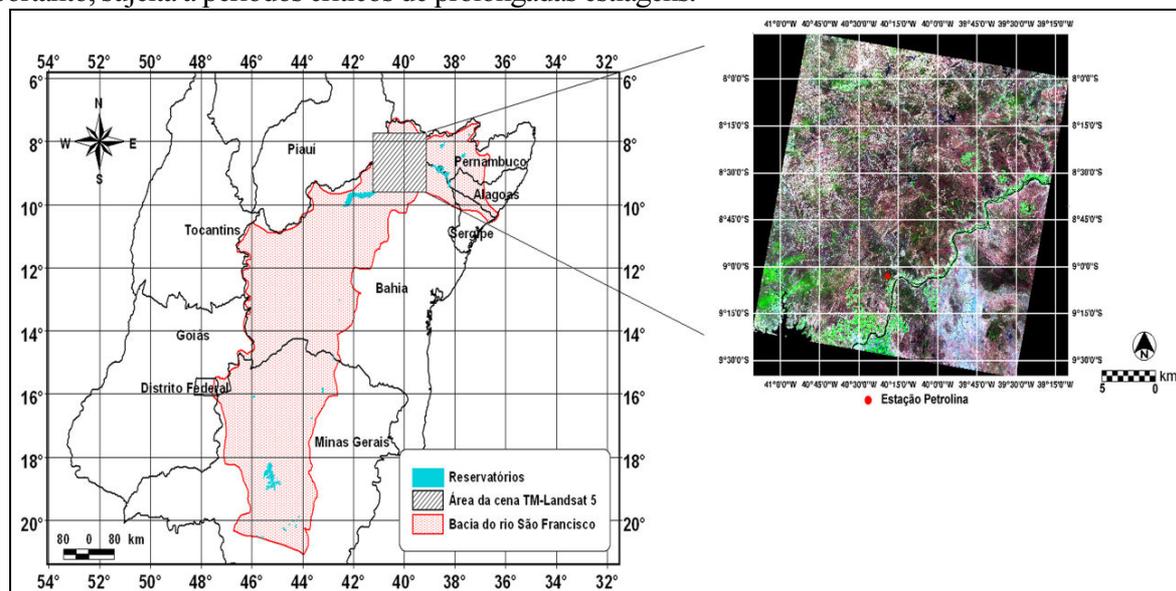


Figura 1. Localização da área de estudo.

2.2. Imagens Landsat 5

Para implementação do SEBAL foram utilizadas 2 imagens do TM - Landsat 5. Essas imagens foram adquiridas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), para o órbita/ponto 217/66, nos dias 12/10/2004 e 13/11/2004, com horários de imageamento de 9h32 e 9h33, respectivamente. As

imagens foram recortadas a fim de permitir um melhor enfoque nas áreas irrigadas. O enquadramento da imagem foi definido pelas seguintes coordenadas, referenciadas ao SAD 69 (*South American Datum*): canto superior esquerdo – 8°58'12''S e 40°45'36''W; canto inferior direito – 9°23'24''S e 40°6'36''W. Essas imagens foram selecionadas por não apresentarem nuvens sobre a região de interesse.

2.3. Dados pluviométricos do TRMM

Uma importante consideração do SEBAL é a determinação dos pixels âncoras (pixel frio e quente), que refletem as condições extremas de temperatura e umidade da área estudada. Considera-se que, no pixel quente, definido em uma área de solo nu e seco, o fluxo de calor latente é zero (Bastiaanssen, 1998a). Surge, então, a necessidade da verificação da ocorrência de chuvas nos dias que antecedem a data de aplicação do SEBAL. Segundo Tasumi (2003), essa verificação deve ser feita nos 4 dias anteriores à data da imagem utilizada para a estimativa de ET real diária e, caso perceba-se a presença de precipitação nesses dias, é necessária a aplicação de um balanço hídrico para a determinação do fluxo de calor latente no pixel quente, uma vez que, nessa situação, esse fluxo não pode ser considerado nulo.

Foram utilizados os dados do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) para a avaliação espacializada da ocorrência de chuvas. O TRMM é um projeto em parceria entre a NASA e a Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial (JAXA), lançado em novembro de 1997, cujo objetivo é o monitoramento da precipitação nos trópicos. Segundo Kawanishi *et al.* (2000), é possível a detecção de taxas de precipitação inferiores a 0,7 mm.h⁻¹. A resolução temporal e espacial desse produto é 3 horas e 0,25°, respectivamente. Os dados do TRMM foram obtidos em: http://daac.gsfc.nasa.gov/data/datapool/TRMM/01_Data_Products/02_Gridded/06_3-hour_Gpi_Cal_3B_42/index.html.

2.4. Dados meteorológicos

As informações meteorológicas para a implementação do SEBAL foram obtidas junto a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) do Semi-Árido. Trata-se de uma torre meteorológica implantada nas dependências da Embrapa em parceria com o INPE, com coordenadas 9,06°S e 40,33°W. As variáveis meteorológicas utilizadas na estimativa da ET real diária foram velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperatura do ar e pressão atmosférica.

2.4. Mapa de uso e ocupação do solo

Nesta pesquisa, utilizou-se o mapa de uso e ocupação do solo para a determinação do coeficiente de rugosidade da superfície (Z_{om}), necessário para a estimativa de ET_{24h}. Esse mapa foi elaborado através da classificação supervisionada e com o método da máxima verossimilhança (Richards, 1986), nos dias 12/10/2004 e 13/11/2004. Para elaboração desse mapa, foi conduzido um trabalho de campo na região, utilizando um receptor GPS (Sistema de posicionamento global) de navegação, que permitiu a identificação de áreas com usos diversificados.

A avaliação da separabilidade espectral de cada classe foi realizada através do índice Jeffries-Matusita (JM) (Richards, 1986), que permite verificar se as áreas de treinamento são homogêneas. Esse índice avalia a separabilidade por pares de classes e quanto mais próximo de dois (2) melhor estabelecidas estão as áreas de treinamento. Nesta pesquisa, os valores de JM estiveram muito próximos de dois, especialmente para fruticultura e água.

O indicador utilizado para avaliar a precisão do processo de classificação foi o coeficiente kappa, que é uma medida da concordância entre as amostras da cena e aquelas derivadas através da classificação da imagem. Essa medida leva em conta todos os elementos da matriz de erros e exclui a concordância que ocorre por acaso (Rosenfield e Fitzpatrick-Lins, 1986).

2.5. Cálculo do balanço instantâneo de energia e da evapotranspiração real diária

A estimativa da evapotranspiração real diária (ET_{24h}) foi realizada com a aplicação do SEBAL (Bastiaanssen *et al.* 1998a). Originalmente Bastiaanssen *et al.* (1998a) propôs o uso da fração

evaporativa (Λ), que é mantida constante ao longo do dia, para o cálculo da ET_{24h} . No entanto, alguns pesquisadores, tais como Allen *et al.* (2002), Trezza (2002) e Tasumi (2003), sugeriram que o aumento da advecção ou da velocidade do vento no período da tarde, sobretudo em climas áridos ou semi-áridos, ocasiona a subestimativa de ET_{24h} , quando se considera que Λ é constante ao longo do dia. Trezza (2002) sugeriu que a fração de referência (F), obtida em função da evapotranspiração de referência horária (método da FAO-56), resolve melhor os efeitos da advecção e das mudanças diárias das variáveis meteorológicas que Λ . Nesta pesquisa, ET_{24h} foi obtida conforme a equação 1 (Trezza, 2002):

$$ET_{24h(x,y)} = F_{(x,y)} \cdot ET_{024h} \quad (\text{mm.dia}^{-1}) \quad (1)$$

onde: $F_{(x,y)}$ é a fração de referência relativa ao momento da passagem do satélite, ET_{024h} é a evapotranspiração de referência diária, cujo valor foi obtido a partir da integração dos valores de evapotranspiração de referência horária (ET_{oh}), calculada pelo método da FAO-56 (Allen, 1998).

Os valores de F foram obtidos conforme a equação 2 (Trezza, 2002):

$$F_{(x,y)} = \frac{ET_{h(x,y)}}{ET_{oh}} \quad [-] \quad (2)$$

onde: $ET_{h(x,y)}$ é a evapotranspiração real horária, dada em função do fluxo de calor latente (λET) e do calor latente de vaporização.

O cálculo de λET se baseia no princípio da conservação de energia e é obtida como um termo residual da equação do balanço de energia, conforme mostra equação 3 (Bastiaanssen *et al.*, 1998a):

$$\lambda ET_{(x,y)} = Rn_{(x,y)} - G_{(x,y)} - H_{(x,y)} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (3)$$

em que: Rn é o saldo de radiação à superfície; G é o fluxo de calor no solo e H é o fluxo de calor sensível.

O saldo de radiação (equação 4) foi, basicamente, estimado em função do albedo da superfície (α_{sup}), da emissividade da superfície (ϵ), da radiação de onda curta incidente à superfície ($R_c \downarrow$), da transmitância atmosférica (τ) e da temperatura radiométrica da superfície (T_s). O albedo foi obtido através do somatório das reflectâncias ponderadas das bandas 1 a 5 e 7 do sensor TM, sendo ainda considerada a correção atmosférica por meio da transmitância (Bastiaanssen *et al.* 1998a; Tasumi, 2003). Já na estimativa da emissividade da superfície considerou-se o uso do índice de área foliar, obtido em função do SAVI (índice de vegetação ajustado ao solo). A temperatura radiométrica da superfície foi calculada em função da radiancia da banda termal do TM e da emissividade da superfície estimada na banda 10,4 μm - 12,5 μm .

$$Rn_{(x,y)} = (1 - \alpha_{sup(x,y)})R_c \downarrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow_{(x,y)} - (1 - \epsilon_{(x,y)})R_L \downarrow \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (4)$$

O fluxo de calor no solo foi estimado em função da razão semi-empírica G/Rn . Essa razão é dependente da temperatura e albedo da superfície e do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), conforme mostra equação 5 (Tasumi, 2003).

$$\frac{G_{(x,y)}}{Rn_{(x,y)}} = (T_s(x,y) / \alpha_{sup(x,y)}) \cdot (0,0038 \cdot \alpha_{sup(x,y)} + 0,0074 \cdot \alpha_{sup(x,y)}^2) \cdot (1 - 0,98 \cdot NDVI_{(x,y)}^4) \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (5)$$

O fluxo de calor sensível foi estimado em função da resistência aerodinâmica (r_{ah}) e da diferença de temperatura (dT), conforme equação 6. Para o cálculo da r_{ah} foram realizadas as estimativas da velocidade de fricção do vento, que é função da velocidade do vento no momento da passagem do satélite e do coeficiente de rugosidade do solo (estimado com a utilização do mapa de uso do solo). Com respeito a dT , o SEBAL considera uma relação linear entre dT e T_s , que requer a identificação dos pixels âncoras. No SEBAL, a estimativa de H é feita de maneira iterativa a fim de permitir a correção da estabilidade atmosférica, que é realizada através do coeficiente de Monin-Obukov. Esse processo iterativo se encerra quando ocorre convergência numérica de r_{ah} e dT no pixel quente (Bastiaanssen, 2000).

$$H_{(x,y)} = \frac{\rho \cdot C_p \cdot dT_{(x,y)}}{r_{ah(x,y)}} \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (6)$$

3.0. Resultados e Discussões

3.1. Dados pluviométricos do TRMM na região de Petrolina/Juazeiro

A avaliação dos mapas de chuva-TRMM nos quatro dias que antecedem as datas das imagens Landsat utilizadas mostrou, para o caso do dia 12/10/2004, a ocorrência de chuva no dia 08/10/2004, com valor máximo de 1,6 mm observado no extremo sudoeste da região estudada. Não foi observada a ocorrência de precipitação pluviométrica nos dias 09, 10 e 11 de outubro de 2004. Para o caso do dia 13/11/2004, não foi observada chuva em toda a área estudada no intervalo entre 9 e 13 de novembro de 2004. Considerando-se as altas temperaturas do ar e as elevadas taxas de evaporação, admitiu-se, neste estudo, que a não ocorrência de chuvas em pelo menos três dias antecedentes já é suficiente para garantir um solo seco na região do pixel quente.

Para o entendimento das oscilações entre os valores da evapotranspiração real estimados nos dias 12/10/2004 e 13/11/2004 foram elaborados mapas da chuva acumulada no período de aproximadamente 1 mês antes das datas das imagens avaliadas, mostrados na Figura 2. Destaque-se que entre 09/10/2004 a 12/10/2004 e entre 09/11/2004 e 13/11/2004 não se observou a ocorrência de chuvas. O total pluviométrico, observado nos dois períodos, não se distribui uniformemente em toda a área. Os totais pluviométricos mostrados na Figura 2a não excederam 4 mm e foram inferiores aos observados na Figura 2b, onde se observam valores em torno de 10 mm. Note-se que, na Figura 2b, as maiores intensidades pluviométricas foram observadas no setor oeste da região, distribuindo-se, aproximadamente, em um alinhamento noroeste-sudeste (NO-SE), na margem esquerda do São Francisco.

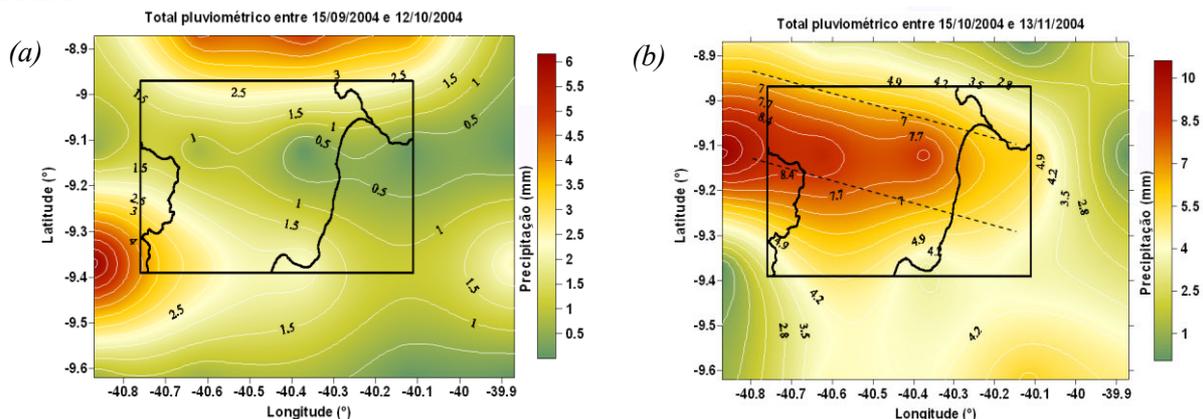


Figura 2. Total pluviométrico na região de Petrolina/Juazeiro, nos períodos (a) 15/09/2004 – 12/10/2004 e (b) 15/10/2004 – 13/11/2004. As linhas pontilhadas definem a direção NO-SE.

3.2. Mapa de uso do solo

O mapa de uso e ocupação do solo, obtido com a imagem TM do dia 12/10/2004, é mostrado na Figura 3. Foi também gerado o mapa para o dia 13/11/2004. Estabeleceram-se seis classes em Petrolina/Juazeiro, a saber: *savana estépica (ou caatinga) aberta*, que é aquela com maior exposição do solo e folhagem mais seca; *savana estépica densa*, que é a vegetação com maior verdor que o observado na savana estépica aberta e que proporciona uma maior cobertura do solo; *solo aberto*, que são áreas de solo exposto; *massa de água*, na sua maioria correspondente à água no leito do rio São Francisco; *fruticultura*, que se concentra, sobretudo, sobre as áreas contempladas pelos projetos de irrigação, e, por fim, a *área urbana*, destacando-se, parte das cidades de Petrolina e de Lagoa Grande.

O coeficiente Kappa obtido no processo de classificação nos dias 12/10/2004 e 13/11/2004 foram 0,9873 e 0,9941, respectivamente. Segundo Landis e Koch (1977), coeficientes Kappa entre 0,8 e 1,0 são considerados excelentes. O índice de precisão geral, que é a razão entre o total de pixels classificados corretamente e o total de pixels utilizados para as áreas de treinamento, foi 98,99% e 99,53% para os dias 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente, sugerindo bons resultados para a classificação supervisionada. Maior parte da área de estudo é composta por vegetação nativa, com ênfase para a

savana estépica aberta, que ocupa em média $\approx 49\%$ da área, enquanto a área de fruticultura corresponde a aproximadamente 12%.

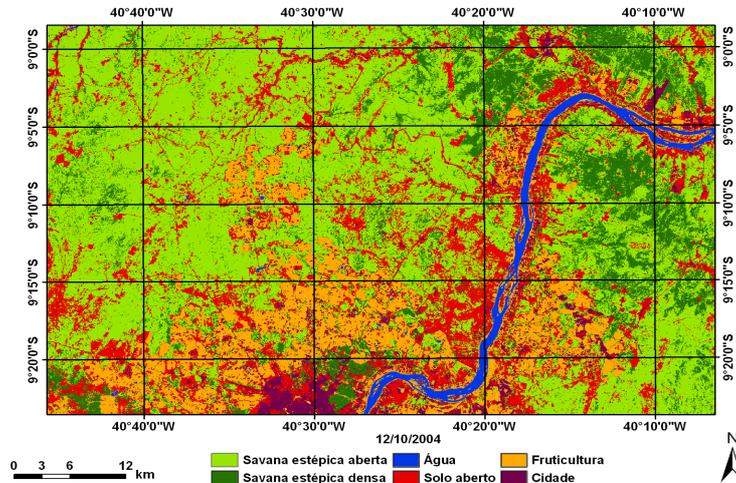


Figura 3. Mapa de uso do solo para o dia 12/10/2004.

3.3. Evapotranspiração real diária na região de Petrolina/Juazeiro

A Figura 4 mostra a distribuição da ET_{24h} na região de Petrolina/Juazeiro, nos dias 12/10/2004 e 13/11/2004. Os mapas de ET_{24h} mostram que os valores mais elevados são encontrados sobre o leito do rio São Francisco. No entanto, nessa região, é importante levar em consideração os erros envolvidos na estimativa do fluxo de calor sobre a superfície de água, que requer medições *in situ* para a validação da expressão utilizada nesta pesquisa, sugerida por Silva e Bezerra (2006).

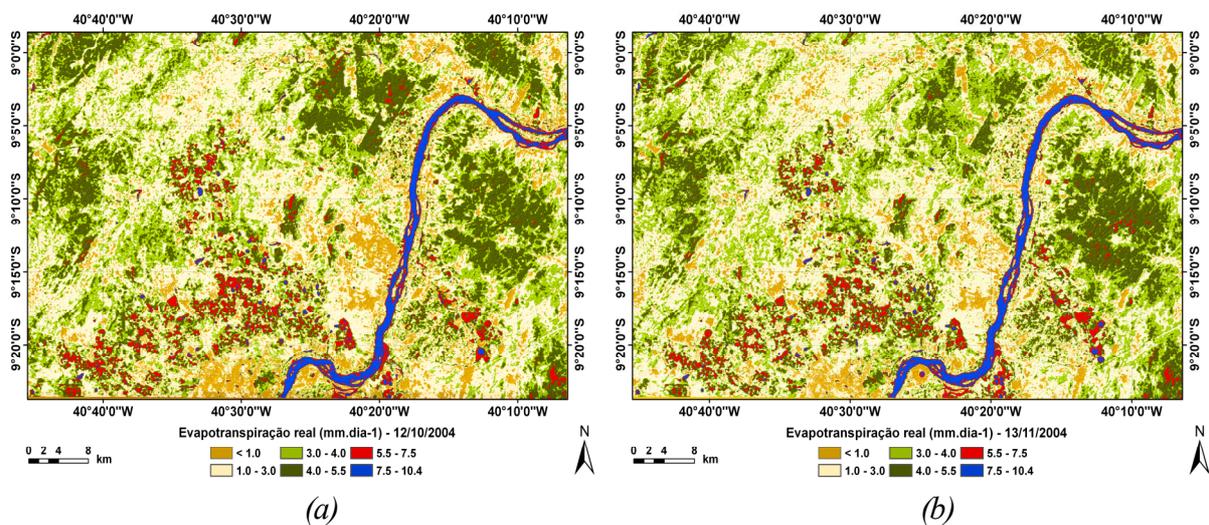


Figura 4. Distribuição espacial da evapotranspiração real diária em (a) 12/10/2004 e (b) 13/11/2004.

As áreas representadas pela cor laranja nos mapas (ver Figura 4) apresentam $ET_{24h} < 1,0 \text{ mm.dia}^{-1}$. Esses valores de evapotranspiração foram observados em áreas de solo aberto e em regiões urbanizadas. As regiões de savana estépica aberta apresentaram valores de ET_{24h} especialmente entre 1,0 e 3,0 mm.dia^{-1} (em amarelo no mapa) nos dias 12/10/2004 e 13/11/2004. Por outro lado, as áreas com vegetação nativa densa foram, sobretudo, representadas pela cor verde escuro, indicando ET_{24h} entre 4,0 e 5,5 mm.dia^{-1} . Bezerra (2006) encontrou valores de $ET_{24h} > 6,0 \text{ mm.dia}^{-1}$, para áreas com vegetação nativa densa, na região do Cariri-CE. As maiores taxas evaporativas, exceto as encontradas sobre o leito do rio São Francisco, foram observadas sobre a região com fruticultura irrigada, cujos valores de ET_{24h} estiveram especialmente entre 5,5 e 7,5 mm.dia^{-1} , nos dois dias avaliados, concordando com os resultados de Azevedo *et al.* (2008).

Para uma avaliação das alterações nos valores da ET_{24h} foi elaborado um mapa de desvios entre os dois dias avaliados. Foram encontrados desvios negativos entre as imagens de evapotranspiração, indicando áreas com elevação da evapotranspiração no dia 13/11/2004, que ocorreram, sobretudo, no alinhamento NO-SE e distribuído na margem direita do rio São Francisco, região sob influência das maiores intensidades pluviométricas (ver Figura 2b).

A Figura 5 mostra o diagrama de caixa para a ET_{24h} nos dias 12/10/2004 e 13/11/2004. Como já era esperado, os valores mais baixos de ET_{24h} foram encontrados em áreas com solo aberto, com o valor mediano variando entre $0,8 \text{ mm.dia}^{-1}$ a $0,6 \text{ mm.dia}^{-1}$, nos dias 12/10/2004 e 13/11/2004, respectivamente, e com desvio padrão de aproximadamente $0,7 \text{ mm.dia}^{-1}$. Não se observou variações expressivas entre os valores medianos de ET_{24h} para a região de savana estépica aberta, que oscilou em torno de $2,0 \text{ mm.dia}^{-1}$ nos dois dias, e onde cerca de 90% dos pixels da amostra selecionada nessa área apresentaram valores $< 3,5 \text{ mm.dia}^{-1}$. Já para áreas com vegetação nativa densa, o valor mediano da ET_{24h} esteve em torno de $4,8 \text{ mm.dia}^{-1}$ nos dias avaliados.

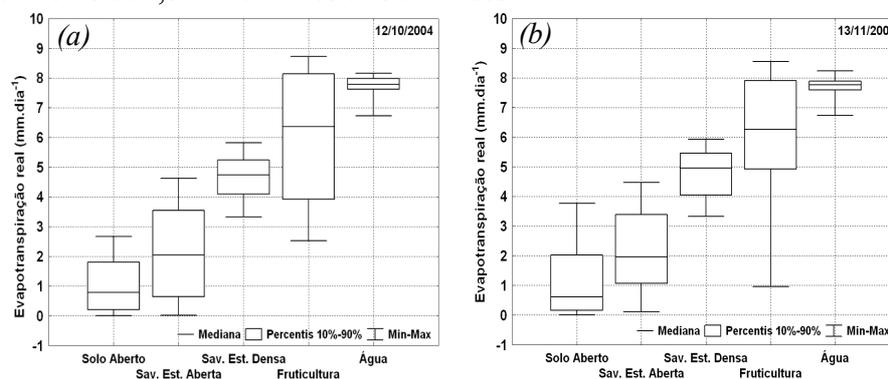


Figura 5. Diagrama de caixa da ET_{24h} para os dias (a) 12/10/2004 e (b) 13/11/2004.

Em média, a evapotranspiração real mediana observada nas amostras em áreas com fruticultura irrigada foi $6,3 \text{ mm.dia}^{-1}$, com desvio padrão $\approx 1,4 \text{ mm.dia}^{-1}$. Azevedo *et al.* (2008) avaliaram a evapotranspiração real diária em dois ciclos de frutificação (estação seca – julho a novembro/2001 e estação chuvosa – dezembro/2001 a março/2002) da uva na região de Petrolina, considerando diferentes quantidades de intervalos de irrigação (1 a 4 turnos de irrigação) e medições *in situ*. Observaram valores de ET_{24h} entre $5,7$ a $7,5 \text{ mm.dia}^{-1}$ durante a brotação e na estação seca, enquanto valores entre $5,6$ e $6,4 \text{ mm.dia}^{-1}$ foram observados durante a maturação na estação chuvosa. Note-se que os resultados encontrados nesta pesquisa se assemelham aos observados por Azevedo *et al.* (2008).

A ET_{24h} observada em áreas com vegetação nativa densa foi aproximadamente 59% mais elevada que a observada em áreas com vegetação mais esparsa. A ET_{24h} em região de solo aberto, savana estépica aberta e densa representaram, em média, 11%, 32% e 77%, da ET_{24h} observada sobre a fruticultura, respectivamente.

Os resultados encontrados nesta pesquisa salientam a complexidade envolvida na variação espacial da evapotranspiração real diária. A distribuição espacial da pluviometria foi responsável pelas diferenciadas respostas no particionamento dos fluxos energéticos e radiativos na área avaliada, o que favoreceu as alterações espaciais da ET_{24h} .

4.0. Conclusões

A evapotranspiração real diária estimada com os dados do sensor TM-Landsat 5 e o algoritmo SEBAL, na região de Petrolina/Juazeiro, mostrou coerência em sua distribuição espacial, sendo os valores mais baixos de ET_{24h} observados em áreas de solo exposto, enquanto os maiores valores foram encontrados nos perímetros irrigados. Os valores de evapotranspiração observados nesta pesquisa concordam com os encontrados na literatura. Os resultados encontrados salientam a complexidade que envolve a distribuição espacial da evapotranspiração real, sendo suas alterações espaciais oriundas da diversidade do uso e cobertura do solo e as temporais relacionadas, sobretudo, a ocorrência de chuvas,

que foi responsável pelas diferenciadas respostas no particionamento dos fluxos energéticos e radiativos na área avaliada, favorecendo as alterações espaciais da ET_{24h} .

5.0. Referências Bibliográficas

Allen, R. G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 27–41, 1998.

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, n. 4, p. 380–394, 2007.

Allen, R. G., Tasumi, M., Trezza, R., *et al.*, 2002, *SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) advanced training and users manual – Idaho implementation*, Idaho University, Idaho, USA.

Bastiaanssen, 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.

Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., *et al.* 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., *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p. 213–229, 1998b.

Bezerra, B. G. **Balanco de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no Cariri cearense através do algoritmo SEBAL**. 2006. 127 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.

Folhes, M. T. **Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos**. 2007. 186 p. (INPE-10462-TDI/929). Tese (Doutorado em sensoriamento remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

Kawanishi, T., Kuroiwa, H., Kojima, M., *et al.* TRMM precipitation radar. **Advanced Space Resource**, v. 25, n. 5, p. 969–972, 2000.

Landis, R. J., Koch, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159–174, 1977.

Mohamed, Y. A., Bastiaansses, W. G. M, Savenije, H. H. G. Spatial variability of evaporation and moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques. **Journal of Hydrology**, v. 289, p. 145–164, 2004.

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. 320 p. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Oliosio, A., Chauki, H., Courault, D., *et al.* Estimation of evapotranspiration and photosynthesis by assimilation of remote sensing into SVAT models. *Remote Sensing of Environment*, v. 68, n. 3, pp. 341–356, 1999.

Paiva, C. M. **Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR**. 2005. 218 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

Richards, J. A., **Remote sensing digital: An introduction image analysis**. Munich, Germany: Springer-Verlag, 1986, 281 p.

Rosenfield, G. H., Fitzpatrick-Lins, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52, n. 2, p. 85–91, 1986.

Silva, B. B. da, Bezerra, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM-Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, n. 2, p. 1–10, 2006.

Tasumi, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery**. 2003. 355 p. Tese (Doutorado em Filosofia em Engenharia Biológica e Agrícola) - University of Idaho, Moscow, Idaho, EUA, 2003.

Tasumi, M.; Trezza, R.; Allen, R., *et al.* Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. **Irrigation and Drainage Systems**, 2005, v. 19, p. 355–376, 2005.

Trezza, R. **Evapotranspiration using a satellite-based surface energy balance with standardized ground control**. 2002. 317 p. Tese (Doutorado em Filosofia em Engenharia Biológica e Agrícola) - Utah State University, Logan, Utah, 2002.