

BALANÇO HÍDRICO EM LARGA ESCALA COM IMAGENS LANDSAT 8 EM AGROS-ECOSSISTEMAS DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO

*Antônio Heriberto de Castro Teixeira¹ * & Janice Freitas Leivas¹ & Gustavo Bayma-Silva¹*

Resumo – Doze imagens Landsat 8 foram usadas em conjunto com uma rede de onze de estações agrometeorológicas para a modelagem em larga escala de indicadores do balanço hídrico nos agros-ecossistemas da bacia hidrográfica do Submédio São Francisco, compostos por vegetação natural e culturas irrigadas. O algoritmo SAFER foi usado para a obtenção da evapotranspiração (ET), a qual foi usada em conjunto com dados de precipitação (P) interpolados. Para a classificação da vegetação e caracterização dos indicadores, o algoritmo SUREAL foi aplicado na determinação da resistência da superfície (r_s) sendo valores limites de r_s usados na separação em culturas agrícolas e espécies da Caatinga. Nas condições naturais mais úmidas do início do ano, as taxas de evapotranspiração na vegetação natural foram em torno de 30% daquelas para culturas irrigadas, enquanto que nas mais secas estas ficaram em torno de 6%. Considerando-se todo o ano, as culturas irrigadas consumiram cinco vezes mais água que as espécies da Caatinga, uma quantidade extra de 870 mm ano⁻¹. Maiores cautelas com relação ao manejo de irrigação devem ser tomadas no período climaticamente mais seco do ano, devido ao aumento da retirada da água do Rio São Francisco, criando maiores possibilidades de conflitos entre os setores agrícolas e outros usuários da água.

Palavras-Chave – SAFER; SUREAL; evapotranspiração; deficiência hídrica.

INTRODUÇÃO

O Submédio São Francisco, localizado na região semiárida do Nordeste brasileiro, se tornou uma região de crescimento agrícola importante, devido ao desenvolvimento da irrigação, principalmente em fruteiras, nas vizinhanças do Rio São Francisco. Sob estas condições de mudança de uso da terra, aliadas às alterações climáticas, o uso do sensoriamento remoto por imagens de satélites em conjunto com dados agrometeorológicos é relevante para a quantificação dos componentes do balanço hídrico em larga escala, o que tem sido realizado em distintas condições ambientais (Cleugh *et al.*, 2007; Teixeira *et al.* 2014).

Poucas pesquisas foram realizadas com aplicação do satélite Landsat 8 (L8) para a determinação de parâmetros hídricos em diferentes ecossistemas com mudanças crescentes de uso da terra. O atual trabalho quantifica indicadores do balanço hídrico com aplicação do algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) para determinação da evapotranspiração atual (ET) em imagens do satélite L8 em conjunto com grades de precipitação (P) na área de expansão da agricultura irrigada na bacia hidrográfica do Submédio São Francisco. Indicadores hídricos foram aplicados a través da combinação de ET e P e o algoritmo SUREAL (*Surface Resistance Algorithm*) foi aplicado para a classificação dos agros-ecossistemas em culturas irrigadas e espécies naturais da Caatinga na análise destes indicadores (Teixeira, 2012; Teixeira *et al.*, 2014).

Os resultados da atual pesquisa podem subsidiar o manejo racional dos recursos hídricos nas atuais condições de mudanças de uso da terra e climáticas com conseqüente acréscimo da competição por água entre a agricultura e outros setores. O sucesso das modelagens em larga escala

¹Embrapa Monitoramento por Satélite, {heriberto.teixeira; janice.leivas;gustavo.bayma}@embrapa.br
heriberto.teixeira@embrapa.br; Fone 19 3211-6200; Fax: 19 3211-6222; www.cnpm.embrapa.br

realizadas com o novo satélite L8 traz mais confiança para testes e validações em outras áreas da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, onde, provavelmente, serão necessárias apenas calibrações das equações originais.

MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta a área de expansão da agricultura irrigada na bacia hidrográfica do Submédio São Francisco (SF) no Nordeste (NE) do Brasil e as estações agrometeorológicas da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) utilizadas.

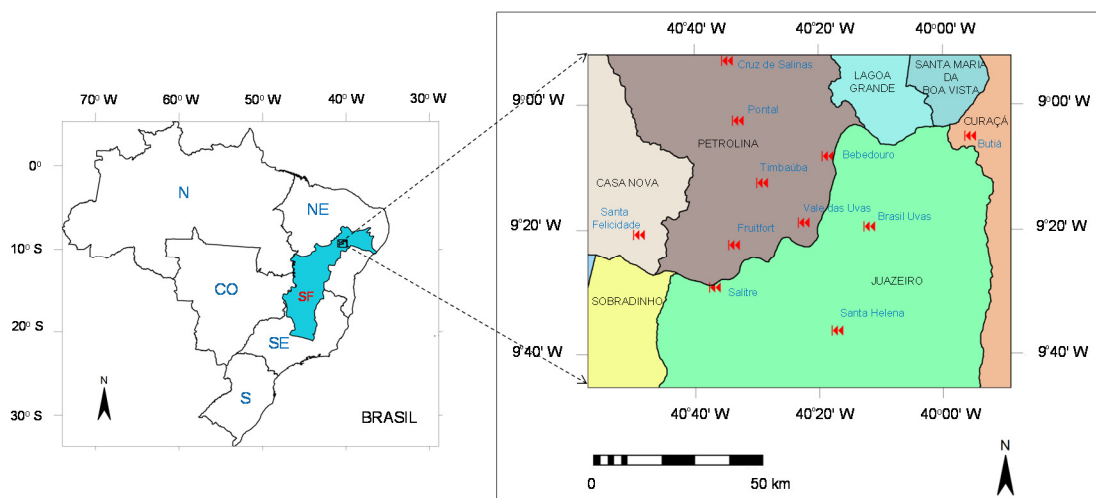


Figura 1 – Localização da área de expansão da agricultura irrigada na bacia hidrográfica do Submédio São Francisco (SF) no Nordeste (NE) do Brasil, com detalhes para as estações agrometeorológicas (em vermelho).

A área de expansão da agricultura irrigada na bacia hidrográfica do Submédio São Francisco é localizada na região semiárida do Nordeste do Brasil. A vegetação natural, “Caatinga” é o tipo de vegetação predominante, a qual tem sido substituída rapidamente por culturas irrigadas, nas margens do Rio São Francisco. Com exceção das áreas de altitudes elevadas, em geral, a região apresenta normais anuais de temperatura do ar (T_a) acima de 24 °C. A maioria das chuvas cai durante o primeiro quadrimestre do ano, representando 68% da quantidade anual. Principalmente fruteiras compõem os cultivos agrícolas irrigados, na maioria videiras, mangueiras, goiabeiras e bananeiras, circundadas pelas espécies da Caatinga. (Teixeira, 2012).

Os dados climáticos foram usados em conjunto com doze Imagens do satélite L8 envolvendo diferentes condições termo hídricas, sendo três para 2013, quatro para 2014 e cinco para 2015, respectivamente para dia/ano, 150, 246, 278/2013; 009, 025, 153, 265/2014; e 265, 252, 300, 316, 348/2015. As imagens de 2013 e 2014 foram normalizadas para o ano de 2015 de acordo com os dados de evapotranspiração de referência (ET_0), e após sucessivas interpolações até serem obtidas quatro imagens por mês, as razões ET/ET_0 médias foram multiplicadas pelos valores mensais da ET_0 , fornecendo os valores da ET nesta escala de tempo, representativos para o ano de 2015.

Para o cálculo do albedo da superfície (α_0) através do satélite L8, foram usados os albedos planetários (α_{pb}) para as bandas de 1 a 7, com resolução espacial de 30m, enquanto que para a temperatura da superfície (T_0) utilizaram-se as bandas termais 10 e 11, com resolução espacial de 100 m.

O albedo planetário para todo o espectro solar (α_p) foi considerado a soma total dos diferentes valores de α_{pb} de acordo com o peso para cada banda:

$$\alpha_p = \sum w_b \alpha_{p_b} \quad (01)$$

onde w_b é a razão da radiação solar incidente no topo da atmosfera em uma banda particular, para a soma da radiação solar de todas as bandas.

As radiações espectrais das bandas 10 (R_{esp_10}) e 11 (R_{esp_11}) das regiões termais do L8 foram convertidas em temperaturas aplicáveis no topo da atmosfera (T_b) pela inversão da lei de Planck no intervalo de comprimento de onda de 10,6–11,19 μm (b_{10}) e 11,5–12,51 μm (b_{11}):

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{R_{esp_b} + 1}\right)} \quad (02)$$

onde K_1 (774.89 e 480.89) e K_2 (1321.08 e 1201.14) para as bandas 10 e 11, respectivamente, são os coeficientes de conversão para o satélite L8. A média de T_b para as duas bandas foi considerada a temperatura de brilho (T_{brilho}).

Os resultados para α_p e T_{brilho} foram corrigidas atmosféricamente para obtenção do albedo da superfície (α_0) e temperatura da superfície (T_0) através de equações de regressão obtidas através de medições simultâneas em campo e por sensoriamento remoto na região semiárida do Nordeste brasileiro (Teixeira *et al.*, 2014).

De posse de α_0 , T_0 e NDVI, os valores instantâneos das razões ET_r (ET/ET_0), além de serem indicadores de umidade do solo, foram multiplicadas pelas grades de ET_0 para estimativa da ET em larga escala:

$$ET_r = \exp\left[a + b\left(\frac{T_0}{\alpha_0 \cdot NDVI}\right)\right] \quad (03)$$

onde a e b são os coeficientes de regressão, os quais foram 1,8 e -0,008, respectivamente, para as condições semiáridas do Brasil (Teixeira *et al.*, 2014).

A Equação 03 não se aplica em corpos d'água ($NDVI < 0$). Então, o conceito da evapotranspiração de equilíbrio (ET_{eq}) é adotado no SAFER (Raupach, 2001):

$$ET_{eq} = 0,035 \left(\frac{s (R_n - G)}{s + \gamma} \right) \quad (04)$$

onde s é a inclinação da curva de relação entre a pressão de saturação do vapor d'água para a T_a , R_n é o saldo de radiação obtido pelo saldo de radiação de ondas curtas e a transmissividade atmosférica, G é o fluxo de calor no interior da superfície, considerado como uma fração de R_n e γ é a constante psicrométrica (Teixeira *et al.*, 2014).

Similarmente ao que foi feito na Austrália (Cleugh *et al.*, 2007), dois outros indicadores de umidade foram aplicados, a razão (BH_r) e diferença (BH_d) da precipitação (P) para a ET.

Para a classificação da vegetação em culturas irrigadas e vegetação natural, o algoritmo SUREAL foi aplicado em imagem representativa do período mais seco do ano:

$$r_s = \exp\left[c\left(\frac{T_0}{\alpha_0}\right)(1 - NDVI) + d\right] \quad (05)$$

onde c e d são coeficientes de regressão, respectivamente 0,04 e 2,72 para as condições semiáridas do Brasil (Teixeira, *et al.*, 2014).

Valores de r_s abaixo de 800 s m^{-1} e NDVI acima de zero foram considerados culturas irrigadas, enquanto que entre 1000 e 20000 s m^{-1} foram tomadas como vegetação natural. O valor maior desta faixa foi incluído para exclusão das superfícies não vegetadas.

RESULTADOS DE DISCUSSÃO

Como os componentes do balanço hídrico são influenciados pelas condições energéticas e hídricas, as tendências das médias dos pixels de P , ET_0 e R_G obtidos na estação agrometeorológica central de Timbaúba (ver Figura 1), são primeiramente apresentadas e analisadas para o período envolvendo a aquisição das imagens ao longo dos anos de 2013 a 2015 (Figura 2).

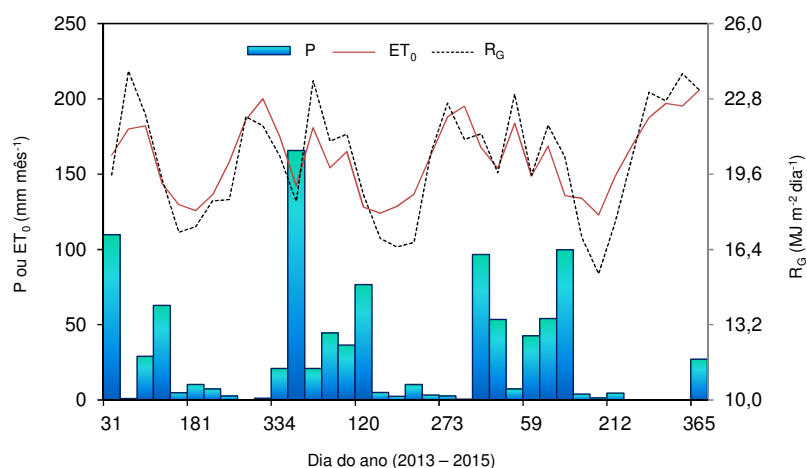


Figura 2 – Médias mensais dos totais de precipitação (P), evapotranspiração de referência (ET_0) e radiação solar global (R_G), obtidas nos anos de 2013 a 2015 na estação agrometeorológica de Timbaúba, Petrolina-PE.

Considerando P , para os anos de aquisição das imagens, ocorreram períodos de concentração das chuvas de nos meses de janeiro a abril e de novembro a dezembro, com as quantidades respectivas representando 94, 93 e 96% dos totais anuais, os quais foram 417, 354 e 242 mm em 2013, 2014 e 2015. Com relação a demanda atmosférica, embora as amplitudes anuais sendo inferiores às de P , os valores mais baixos, tanto de ET_0 como R_G , ocorreram no período de maio a junho, coincidindo com condições de pouca ou ausência de chuvas, época do solstício de inverno no Hemisfério Sul. Neste último período os valores de ET_0 e R_G estiveram abaixo de 130 mm mês^{-1} e $16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, enquanto que no período próximo de posição zenital do Sol de ficaram acima de 180 mm mês^{-1} e $22 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, respectivamente.

Tomando-se a razão P/ET_0 como uma medida rústica do balanço hídrico, constata-se que no ano de 2015, com valor desta razão de 0,12, P atendeu apenas 12% da demanda atmosférica, enquanto que no ano mais úmido de 2013, com esta razão de 0,22, a ocorrência de deficiências hídricas foi menor. O ano de 2014 apresentou-se intermediário com relação as disponibilidades hídricas, com as chuvas atendendo 19% ($P/ET = 0,19$) as taxas de ET_0 . Similarmente, o período com deficiência natural de água mais crítico foi de agosto a outubro, quando a quantidade de chuvas chega 0% da ET_0 , período de maior necessidade de irrigação para as culturas agrícolas.

Devido à necessidade do uso de imagens de 2013 e 2014 para cobertura de todas as condições termo hidrológicas de 2015, para as análises dos valores mensais da ET neste último ano houve a necessidade de normalização e interpolações descritas no item anterior.

A Figura 3 apresenta a variação espacial dos valores mensais da ET, juntamente com os valores médios e desvios padrões, no ano de 2015, na área de expansão da agricultura irrigada, dentro da bacia hidrográfica do Submédio São Francisco, Nordeste do Brasil.

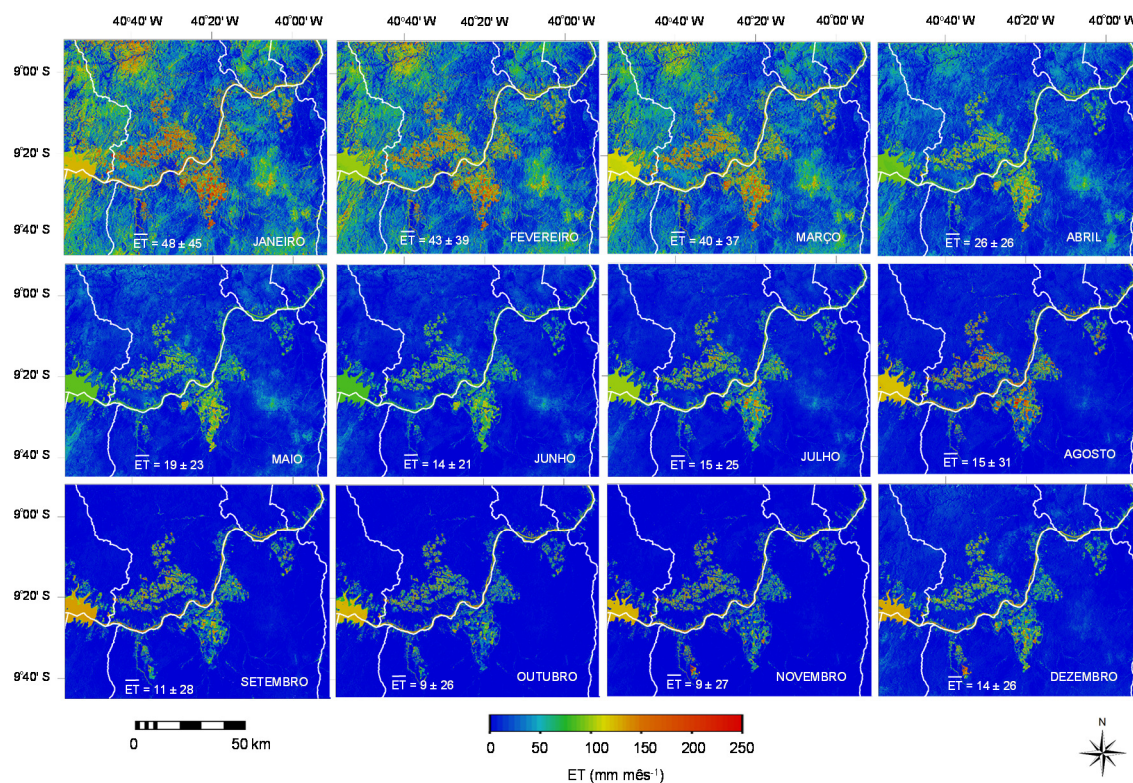


Figura 3 – Variação espacial dos totais mensais de evapotranspiração atual (ET) juntamente com os valores médios e desvios padrões, no ano de 2015, nas áreas de expansão da agricultura irrigada na bacia hidrográfica do Submédio São Francisco, Nordeste do Brasil.

Percebem-se claramente as variações espaciais e temporais da quantidade de água transferida para atmosfera nos diferentes agros-ecossistemas. Os maiores valores de ET aconteceram no mês de janeiro, com vários pixels acima de 200 mm mês^{-1} , tanto para as culturas irrigadas como para as espécies da Caatinga, havendo uma maior homogeneidade espacial quando comparados com outros períodos do ano. Por outro lado, o menor valor médio da ET aconteceu no mês de outubro, com vários pixels com ET zero nas áreas de vegetação natural.

Os três primeiros meses do ano, devido às irregularidades das chuvas, apresentaram maiores variações espaciais da ET, quando comparados com o período mais seco de maio a julho. A razão da menor variação espacial da ET nos meses mais secos deve-se ao fato da homogeneidade da umidade na zona das raízes das espécies da Caatinga, que representa a maior área. Entretanto, de maio a junho, algumas áreas da Caatinga ainda apresentaram valores intermediários, em torno de 50 mm mês^{-1} , mesmo com uma redução da demanda atmosférica, como consequência da precipitação acumulada no período chuvoso do primeiro quadrimestre do ano (ver Figura 2).

Após a obtenção da variação espacial da ET e de posse de grades de P, obtidas por interpolação em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), foi possível fazer a

contabilidade hídrica mensal através das tendências dos indicadores BH_d ($P - ET$) e BH_r (P/ET), sendo estas apresentadas na Figura 4, através das médias dos pixels no ano de 2015 em toda a área de expansão da agricultura irrigada na bacia do Submédio São Francisco, Nordeste do Brasil.

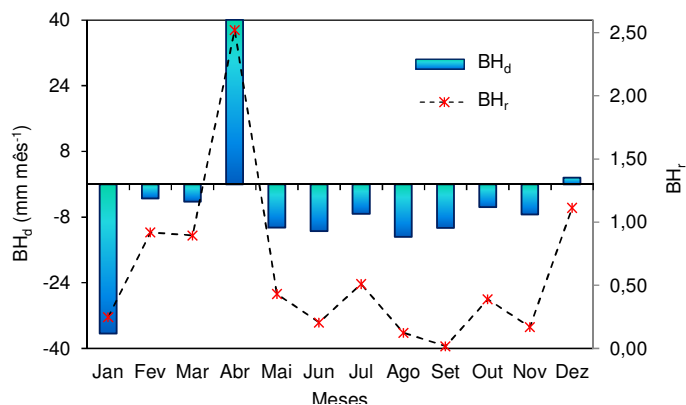


Figura 4 – Tendência dos valores médios mensais dos pixels dos indicadores de balanço hídrico BH_d ($P - ET$) e BH_r (P/ET) durante o ano de 2015, na bacia hidrográfica do Submédio São Francisco, Nordeste do Brasil.

Valores positivos elevados de BH_d indicam condições de excesso hídrico com possibilidades de percolação e escoamento, dependendo da capacidade de retenção de umidade do solo, condições que aconteceram apenas nos meses de maio e dezembro de 2015. Por outro lado, valores negativos indicam maiores possibilidades de deficiências hídricas, as quais ocorreram em quase todos os meses do ano, sendo que janeiro, apesar de estar dentro do período chuvoso, foi o mês que apresentou o valor mais negativo, devido à elevada ET e a baixa e atípica quantidade de chuvas.

De acordo com os valores de BH_r , as condições naturais de umidade do solo foram favoráveis apenas nos meses fevereiro, março e dezembro, quando esteve acima de 0,70, indicando que as chuvas puderam atender cerca de 70% das taxas evapotranspiratória, contribuindo para uma redução da irrigação. Por outro lado, nos meses mais secos os valores deste indicador abaixo de 0,50 indicam maiores necessidades de irrigação.

Através da aplicação do SUREAL na imagem do dia/ano 265/2014, representativa do período mais seco do ano, separaram-se os valores do indicador razão da evapotranspiração (ET_r) para as culturas irrigadas e espécies da Caatinga através de funções lógicas aos valores de r_s . A Figura 5 apresenta as tendências das médias dos pixels e os desvios padrões ao longo do ano de 2015 na região de expansão da agricultura irrigada no Submédio São Francisco, Nordeste do Brasil.

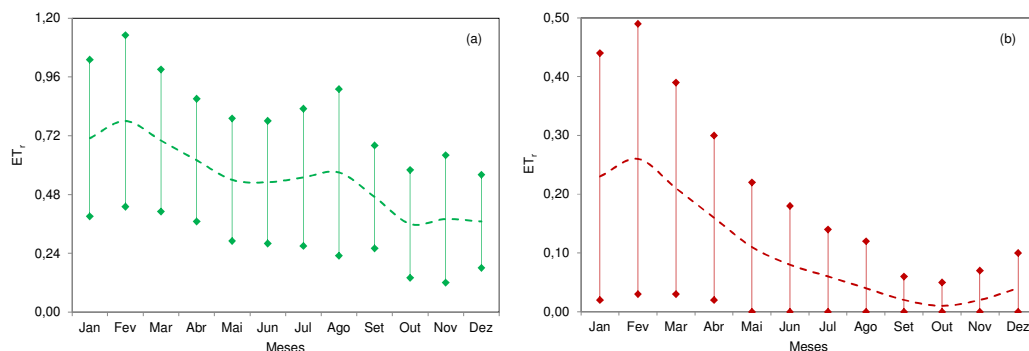


Figura 5 – Tendências mensais dos valores médios e desvios padrões do indicador razão da evapotranspiração (ET_r) para as culturas irrigadas (a) e espécies da Caatinga (b) na bacia hidrográfica do Submédio São Francisco, Nordeste do Brasil.

Em ambos os ecossistemas, percebe-se o pico no mês de fevereiro, situação em que as culturas irrigadas usam também a água proveniente da chuva elevando o valor médio de ET_r acima de 0,70, e pelos valores de desvio padrão, percebe-se máximos em torno e 1,00 enquanto que os valores correspondentes para Caatinga são 0,25 e 0,50. Nos meses mais secos do ano, a ET_r na Caatinga se aproxima de 0,00 enquanto que nas condições de irrigação ocorreu um novo pico em agosto, em alguns casos acima de 0,90, como consequência do uso da água do Rio São Francisco para irrigação ocasionando valores incrementais de consumo hídrico.

Por um lado, nas culturas bem irrigadas, os valores de ET_r (coeficiente de cultura – K_c) podem ser usados para estimativas dos requerimentos hídricos em diferentes escalas espaciais e temporais (Teixeira, 2012). Nas espécies da Caatinga, este indicador caracteriza as condições de umidade na zona das raízes (Lu et al., 2011). Zhang et al. (2012), estudando estepes na Mongólia, China, encontraram variações estacionais de ET_r com valores médios diários de 0,16 e máximos de 0,75, inferiores às culturas irrigadas e superiores às espécies da Caatinga do atual estudo. Entretanto Lu et al. (2011), na mesma região chinesa, reportaram valores de ET_r maiores que 1,00 para seis diferentes ecossistemas, similares àqueles para culturas bem irrigadas do Submédio São Francisco.

As condições hídricas da vegetação natural e das culturas irrigadas geraram diferentes taxas de transferência do vapor d'água para a atmosfera. A Figura 6 apresenta a tendência dos valores médios e desvios padrões (DP) da ET e dos valores incrementais (ET_{inc}) ao longo do ano de 2015, na área de expansão da agricultura irrigada no Submédio São Francisco, Nordeste do Brasil.

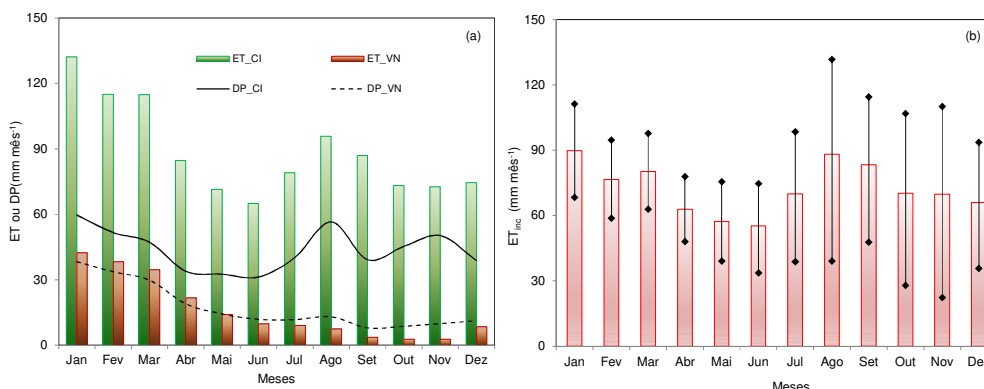


Figura 6 – Tendências mensais dos valores médios e desvios padrões (DP) da transferência de vapor d'água na bacia hidrográfica do Submédio São Francisco, Nordeste do Brasil. (a) valores médios mensais da evapotranspiração atual (ET) em culturas irrigadas (CI) e vegetação natural (VN) e (b) evapotranspiração incremental (ET_{inc}).

Claramente podem-se ver os valores maiores da ET na vegetação natural (VN) em janeiro enquanto que nas culturas irrigadas (CI) acontece mais um pico em agosto (Figura 6a). Entretanto, enquanto que as taxas da ET em VN foram em torno de 30% daquelas em CI, esta porcentagem foi em torno de 6% no período climaticamente mais seco. Para todo o ano de 2015 o ecossistema CI consumiu cinco vezes mais água que o VN, uma quantidade extra de 870 mm ano^{-1} . De acordo com a tendência da ET_{inc} apresentada na Figura 6b, percebe-se que a quantidade elevada nos primeiros meses do ano é mais fortemente fornecida pelas chuvas, enquanto que seu incremento de junho a agosto mostra uma retirada contínua de água do Rio São Francisco, caindo nos meses subsequentes quando o mês de outubro caracteriza a entrada nos estágios finais dos ciclos produtivos generalizados das culturas irrigadas.

Percebe-se então que diante dos cenários de escassez hídrica, com redução da vazão do rio, maiores cautelas para o manejo racional da irrigação devem ser tomadas no período mais seco do

ano para que se evitem conflitos entre os setores agrícolas e outros usuários da água na bacia hidrográfica do Submédio São Francisco.

CONCLUSÕES

O uso conjunto de imagens do satélite Landsat 8 e estações agrometeorológicas permitiu a quantificação e análises de indicadores de balanço hídrico ao longo do ano de 2015 envolvendo diferentes condições termo hidrológicas e agros-ecossistemas mistos na bacia hidrográfica do Submédio São Francisco, Nordeste do Brasil. Estes indicadores podem subsidiar um melhor entendimento da dinâmica das variáveis hídricas em larga escala, aspecto importante nos atuais cenários de escassez hídrica e mudanças climáticas. Considerando-se toda a região de expansão da agricultura irrigada na bacia, os maiores valores médios de evapotranspiração aconteceram no mês de janeiro a fevereiro, havendo uma maior homogeneidade espacial, enquanto que as menores médias ocorreram de outubro a novembro. As condições naturais de umidade do solo foram favoráveis para a agricultura apenas nos meses fevereiro, março e dezembro, indicando que as chuvas puderam atender cerca de 70% das taxas evapotranspiratórias. Enquanto que as taxas de evapotranspiração na vegetação natural foram em torno de 30% daquelas para culturas irrigadas nas condições naturais mais úmidas, estas ficaram em torno de 6% no segundo período climaticamente mais seco. Para todo o ano de 2015 as culturas irrigadas consumiram cinco vezes mais água que a vegetação natural. Maiores cautelas com irrigação devem ser tomadas no período climaticamente mais seco do ano para que se evitem conflitos entre os setores agrícolas e outros usuários da água.

REFERÊNCIAS

- CLEUGH, H.A.; LEUNING, R.; MU, Q.; RUNNING, S.W. (2007). Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. *Remote Sensing of Environment* (106), pp. 285–304.
- LU, N.; CHEN, S.; WILSKEL, B.; SUN, G.; CHEN, J. (2011). Evapotranspiration and soil water relationships in a range of disturbed and undisturbed ecosystems in the semi-arid Inner Mongolia, China. *Journal of Plant Ecology* (4), pp. 49–60.
- RAUPASCH, M.R. (2001). Combination theory and equilibrium evaporation. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, (127), pp. 1149–1181.
- TEIXEIRA, A. H. de C. (2012) Modelling water productivity components in the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. In *Sustainable water management in the tropics and subtropics and case studies in Brazil*. Org. por Bilibio, C.; Hensel, O. e Selbach, J. 1ed. Kassel: University of Kassel, (3), pp. 1077–1100.
- TEIXEIRA, A.H. de C.; HERNANDEZ, F.B.T.; LOPES, H.L.; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L.H. (2014). A Comparative Study of Techniques for Modeling the Spatiotemporal Distribution of Heat and Moisture Fluxes in Different Agroecosystems in Brazil. In *Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content*. Org. por Petropoulos, G.G. 1ed. Boca Raton, Florida: CRC Group, Taylor and Francis, pp. 169–191.
- ZHANG, F.; ZHOU, G.; WANG, Y.; YAN, F.; CHRISTER NILSSON, C. (2012). Evapotranspiration and crop coefficient for a temperate desert steppe ecosystem using eddy covariance in Inner Mongolia, China. *Hydrological Processes* (26), 379–386.