



INDICADORES DE BALANÇO HÍDRICO ATRAVÉS DE IMAGENS MODIS E DADOS CLIMÁTICOS NO POLO AGRÍCOLA PETROLINA/JUAZEIRO

Antônio Heriberto de Castro Teixeira¹; Janice Freitas Leivas² & Gustavo Bayma-Silva³

RESUMO – O polo agrícola Petrolina/Juazeiro, localizado na região semiárida do Nordeste do Brasil, tem apresentado rápidas mudanças de uso da terra as quais aliadas às condições de escassez hídricas podem acarretar em conflitos entre os usuários da água. Estes atuais cenários demandam estudos de balanço hídrico em larga escala para subsídio às políticas hídricas. Objetivando estas análises, as bandas de reflectância do produto MODIS MOD13Q1 foram usadas em conjunto com grades de dados agrometeorológicos de uma rede de 14 estações nos municípios de Petrolina, Estado de Pernambuco; e Juazeiro, Estado da Bahia, durante o ano de 2015. Para a precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET₀) os dados das estações foram interpolados, enquanto que para a evapotranspiração atual (ET), o algoritmo SAFER (Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving) foi usado. Dois indicadores hídricos foram aplicados, o indicador razão dos componentes do balanço hídrico ($BH_r = P/ET$) e o indicador razão das evapotranspirações ($ET_r = ET/ET_0$). Estes indicadores podem subsidiar um melhor entendimento da dinâmica das variáveis hídricas, relevante para apreciação do impacto das condições atuais de escassez hídrica no balanço hídrico em larga escala. Com esta contabilidade nos municípios de Petrolina e Juazeiro, pôde-se concluir que Juazeiro apresenta condições naturais mais úmidas.

ABSTRACT– The Petrolina/Juazeiro agricultural pole, located at the semi-arid region of the Northeast Brazil, has experienced fast land use changes, which together with water scarcity may increase water conflicts among water users. These actual scenarios demand large-scale water balance studies to subsidize water policies. Aiming these analyses, the reflectance bands from the MOD13Q1 MODIS product were used together with gridded agrometeorological data from a net of 14 stations in the municipalities Petrolina, Pernambuco (PE) state; and Juazeiro, Bahia (BA) state, during the year 2015. Precipitation (P) and reference evapotranspiration (ET₀) data were interpolated, while for actual evapotranspiration (ET), the SAFER (Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving) algorithm was used. Two water balance indicators were applied, the water Balance Ratio ($WB_r = P/ET$) and the evapotranspiration ratio ($ET_r = ET/ET_0$). These indicators may help a better understanding of the water variable dynamics on a large scale, relevant for appraising the impacts of the actual water scarcity conditions over the large-scale water balance. With this water balance in the municipalities of Petrolina and Juazeiro, it was concluded that the second one presented moistier natural conditions.

Palavras-Chave – Precipitação; demanda atmosférica; evapotranspiração.

1) Embrapa Monitoramento por Satélite. Campinas-SP, fone (19) 32116200, fax (19) 321 6222

2) Embrapa Monitoramento por Satélite. e-mail: janice.leivas@embrapa.br

3) Embrapa Monitoramento por Satélite. e-mail: gustavo.bayma@embrapa.br

INTRODUÇÃO

Disputas sobre os recursos hídricos estão gerando tensões localmente, nacionalmente e internacionalmente. O aumento dos conflitos é esperado na medida em que as populações se expandem e as condições de escassez hídrica ocorrem. Diálogos entre os diferentes usuários da água são necessários nas bacias hidrográficas para acordos sobre alocação. O sucesso destes diálogos depende de base científica e nas precisões das informações em diferentes escalas espaciais e temporais (Teixeira, 2009).

Para uma exploração sustentável dos recursos hídricos e garantia da disponibilidade da água para os grupos competitivos, deve-se considerar as condições do balanço hídrico em ecossistemas mistos nas bacias hidrográficas. As estimativas dos componentes deste balanço em larga escala são importantes para o manejo racional da água, quando se almeja mais produção de alimentos, desenvolvimento rural e benefícios ecológicos por unidade de água consumida. Estes estudos minimizam o uso adicional da água na agricultura, resultando em uma maior disponibilidade para manutenção dos ecossistemas (Cai *et al.*, 2002).

Para quantificação do balanço hídrico em larga escala, além da precipitação (P) como um parâmetro de entrada, deve-se quantificar também a evapotranspiração (ET), a qual é criticamente importante para a produção de alimentos, entretanto o aumento de suas taxas significa menos água disponível para os usos humanos e ecológicos. Precisão nesta quantificação melhoram a qualidade das informações, porém os algoritmos para estimativas destes componentes devem ser biofisicamente realistas, mas com simplicidade suficiente para implementação em larga escala (Cleugh *et al.*, 2007).

A agricultura no polo agrícola Petrolina/Juazeiro, nas vizinhanças do Rio São Francisco, tem se destacado nas últimas décadas, elevando a demanda hídrica para irrigação. Por um lado, a maior parte dos produtos agrícolas é proveniente de fruteiras irrigadas, principalmente para o mercado externo, devido aos altos investimentos nas tecnologias. Por outro lado, o maior impacto da substituição das espécies naturais por estas culturas é a poluição difusa causada pela drenagem dos produtos agrícolas podendo afetar as diferentes espécies tanto terrestres como aquáticas (Teixeira, 2012).

Considerando-se as consequências ambientais dos atuais cenários no polo agrícola Petrolina/Juazeiro, pesquisas são necessárias para avaliação das condições de balanço hídrico, especialmente para aplicações operacionais nos diferentes agros-ecossistemas com elevada heterogeneidade espacial e temporal. O objetivo deste trabalho foi combinar geotecnologias para modelagem das variáveis hídricas em larga escala. Dados de climáticos interpolados e de ET estimados pelo algoritmo SAFER (Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving) foram usados em conjunto com imagens MODIS. Para consideração das condições de umidade do solo estes parâmetros foram combinados para geração de indicadores agrometeorológicos (Teixeira *et al.*, 2015).

MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta a localização dos municípios Petrolina-PE e Juazeiro-BA, na região Nordeste do Brasil e a rede de estações agrometeorológicas utilizada.

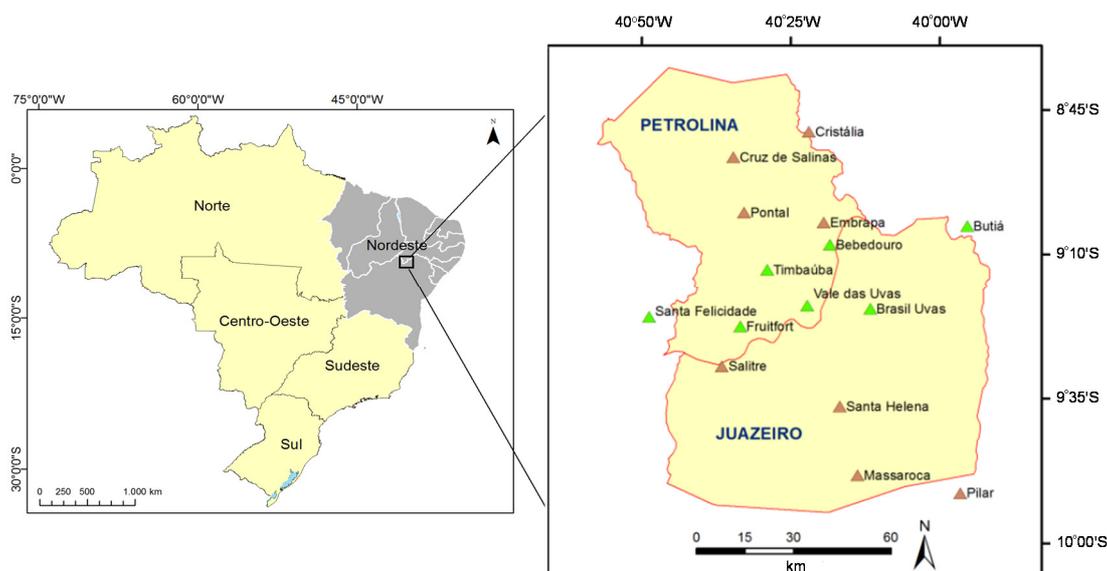


Figura 1 - Localização dos municípios Petrolina-PE e Juazeiro-BA no Nordeste do Brasil e estações agrometeorológicas utilizadas. As estações representadas por triângulos verdes estão dentro de fazendas com fruteiras irrigadas enquanto que aquelas com triângulos marrons estão em vegetação natural (Caatinga).

Os parâmetros climáticos de entrada na modelagem, radiação solar global (RG), temperatura do ar (T_a) e evapotranspiração de referência (ET_0) foram escalados para o período de composição de imagens de 16 dias do produto MODIS MOD13Q1 (resolução espacial de 250m). Procedimento similar foi realizado por Cleugh *et al.* (2007) na Austrália.

Para a obtenção do albedo da superfície (α_0) a seguinte equação foi aplicada (Teixeira *et al.*, 2014):

$$\alpha_0 = a + b\alpha_1 + c\alpha_2 \quad (1)$$

onde a, b e c são coeficientes de regressão, considerados como 0,08, 0,41 e 0,14, obtidos sob diferentes tipos de vegetação e condições termo hídricas na região semiárida do Nordeste do Brasil.

A temperatura da superfície (T_s) foi estimada como resíduo no balanço de radiação diário (Teixeira *et al.*, 2015):

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{RG - \alpha_0 RG + \epsilon_A \sigma T_a^4 - R_n}{\epsilon_S \sigma}} \quad (2)$$

onde ϵ_A e ϵ_S são respectivamente as emissividades da atmosfera e da superfície; σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) e R_n o saldo de radiação.

O índice Diferença da Vegetação Normalizado (NDVI) é um indicador relacionado com as condições hídricas e de vegetação, obtido através das imagens de satélite por:

$$NDVI = \frac{\alpha p_{(ip)} - \alpha p_{(ver)}}{\alpha p_{(ip)} + \alpha p_{(ver)}} \quad (3)$$

onde α_{ip} and α_{ver} representam os albedos planetários para os comprimentos de onda no infravermelho próximo (subscrito *ip*) e no vermelho (subscrito *ver*), que para o MODIS são respectivamente as bandas 2 e 1.

Os valores diários de R_n foram estimados com a equação de Slob:

$$R_n = (1 - \alpha_0)RG - a_L \tau \quad (4)$$

onde τ é a transmissividade e a_L é um coeficiente de regressão que foi espacialmente distribuído através da sua relação com T_a (Teixeira *et al.*, 2008).

Os valores instantâneos da razão da ET para ET0 (ETr), além de serem indicadores de umidade do solo, foram modelados e multiplicados pelas grades de ET0 das estações agrometeorológicas para a estimativa da ET em larga escala (Teixeira *et al.*, 2014, 2015).

$$ETr = \exp \left[a_s + b_s \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \quad (5)$$

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

Similarmente com o que foi feito na Austrália (Cleugh *et al.*, 2007) e em Minas Gerais (Teixeira *et al.*, 2015), o indicador razão do balanço hídrico (BHr) foi aplicado:

$$BHr = \frac{P}{ET} \quad (6)$$

O indicador representado pela Eq. 6 permite a caracterização das condições de umidade do clima, contabilizando as chuvas e o consumo hídrico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta os valores médios dos pixels de P e ET0 em termos de dia juliano (DJ) obtidos através de interpolação dos dados das estações distribuídas nos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, Nordeste do Brasil. A ET0 foi calculada pelo método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), onde as variáveis de entrada são RG, T_a , umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento a 2m de altura (u).

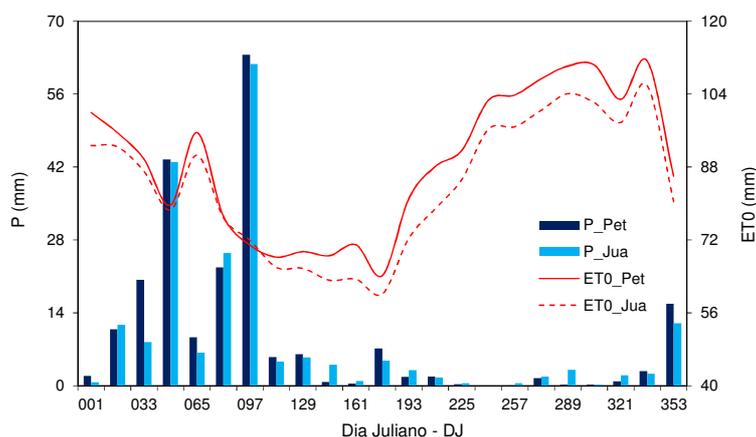


Figura 2 – Valores médios dos totais de precipitação (P) e evapotranspiração de referência (ET0) para períodos de 16 dias nos municípios Petrolina-PE (Pet) e Juazeiro-BA (Jua), no Nordeste do Brasil.

Considerando P, ocorreram maiores concentrações de chuvas nos meses de fevereiro a abril (DJ: 033-112), chegando a 159 mm (73% do total anual) e 145 mm (71% do total anual), respectivamente em Petrolina-PE e Juazeiro-BA, influenciando os parâmetros hídricos e de vegetação obtidos pelas imagens MODIS neste período. Com relação aos períodos das outras imagens, as únicas precipitações na escala temporal de 16 dias acima de 10 mm ocorreram no início do ano para DJ 017-032 (janeiro) e no final do ano (DJ 353-365), proporcionando menor efeito nos resultados nestes períodos do ano de 2015.

Com relação à demanda atmosférica, embora as amplitudes de ET0 sendo inferiores às de P, os valores mais baixos para períodos de 16 dias, ocorreram no período de abril a julho (DJ 113 a 192), quando caíram abaixo de 70 mm, coincidindo com condições de poucas chuvas, na época do solstício de inverno no Hemisfério Sul. Após este período, houve um aumento progressivo da demanda atmosférica e nos períodos envolvendo as condições de posição zenital do Sol e baixa nebulosidade de agosto a dezembro (DJ 241-352), os valores médios de ET0 na escala temporal de 16 dias ficaram acima de 90 mm. Estas últimas condições proporcionariam grandes taxas evapotranspiratórias se houvesse disponibilidade hídrica na zona das raízes das plantas, o que só foi possível sob irrigação neste período.

A Figura 3 apresenta a distribuição espacial da evapotranspiração para cada período de 16 dias das imagens MODIS, nos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, Nordeste do Brasil, envolvendo diferentes condições termo hídricas ao longo do ano de 2015.

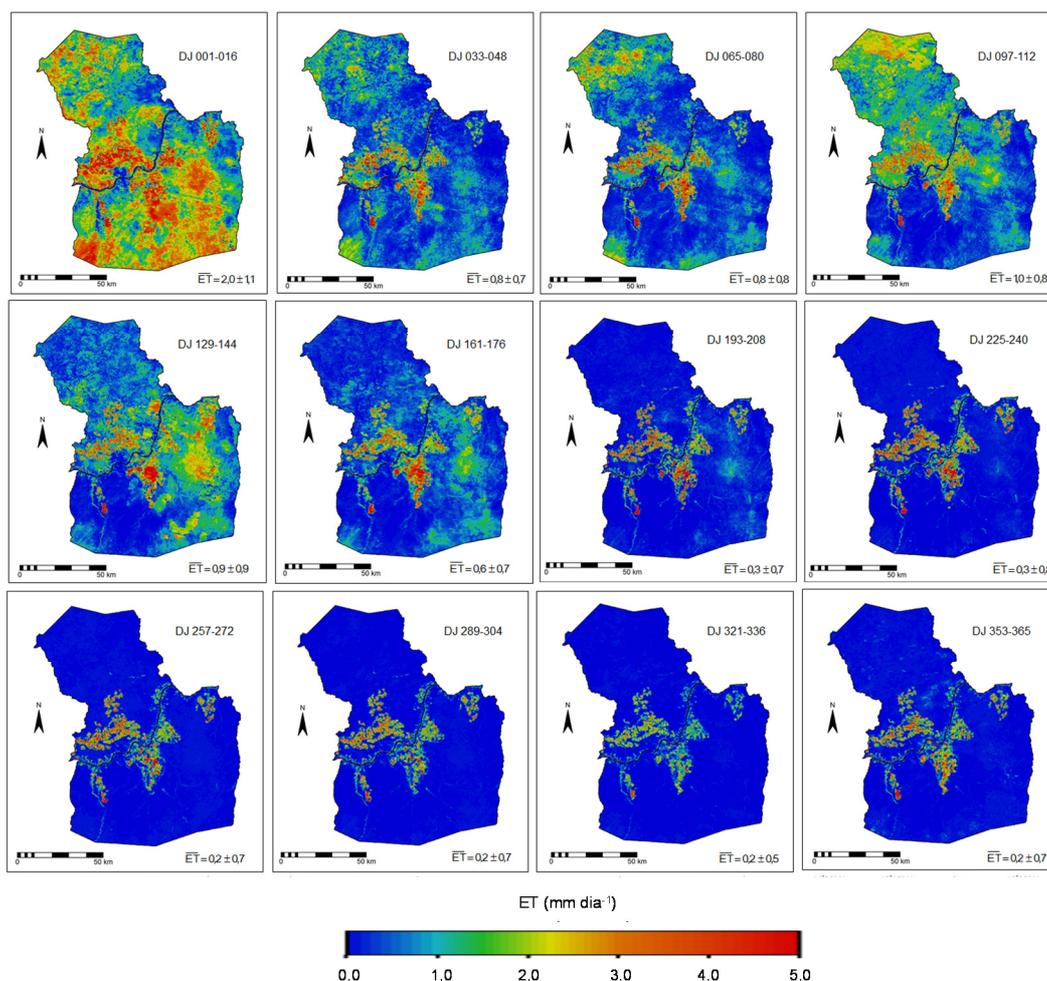


Figura 4 - Distribuição espacial dos valores de evapotranspiração (ET) nos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, Nordeste do Brasil, para períodos de 16 dias das imagens MODIS, envolvendo diferentes condições termo hídricas ao longo do ano de 2015.

Tanto para Petrolina-PE, como para Juazeiro-BA, as variações espaciais e temporais da ET são evidentes, principalmente observando-se as imagens representativas das condições mais secas a partir de setembro até o final do ano de 2015 (DJ 257 a 365), onde se distinguem claramente as áreas irrigadas nas proximidades do Rio São Francisco daquelas de vegetação natural e as imagens representativas das condições mais úmidas de janeiro a maio (DJ 001 a 144), quando as taxas evapotranspiratórias das espécies da Caatinga são mais elevadas acarretando em uma menor heterogeneidade espacial de acordo com os valores de desvio padrão (DP). Similarmente, na Austrália, a ET também refletiu as variações das chuvas e da demanda atmosférica (Cleugh *et al.*, 2007).

Os valores mais elevados da ET, chegando a $5,0 \text{ mm dia}^{-1}$ representam principalmente fruteiras irrigadas, enquanto que nos períodos climaticamente mais secos a ET das espécies da Caatinga se aproximam de zero. As taxas da ET ainda elevadas após o período chuvoso em maio (DJ 129-144) são devidas ao fato que as chuvas prévias contribuíram para a manutenção da umidade na zona das raízes. Considerando toda a área envolvendo os ecossistemas irrigados e

naturais dos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, na escala anual as chuvas representaram 93% das taxas evapotranspiratórias.

A Figura 5 mostra as tendências dos valores médios dos pixels de BHD e ETr, para os municípios de Petrolina-PE (Pet) e Juazeiro-BA (Jua), região Nordeste do Brasil, para períodos de 16 dias das imagens MODIS, abrangendo diferentes condições termo hídricas ao longo do ano de 2015.

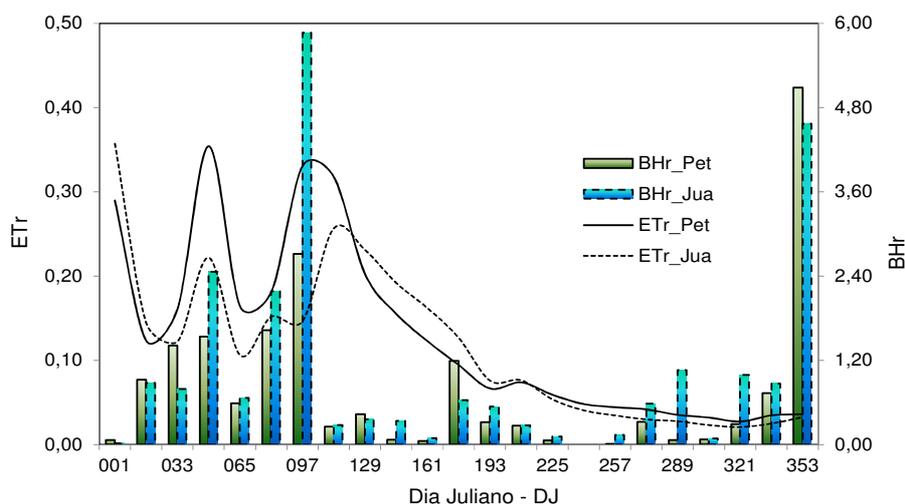


Figura 5 - Valores médios dos indicadores de balanço hídrico nos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, Nordeste do Brasil, para diferentes condições termo hídricas dos períodos de 16 dias das imagens MODIS ao longo do ano 2015. BHR é a razão da precipitação (P) para a evapotranspiração (ET) e ETr é a razão da ET para a evapotranspiração de referência (ET0).

O indicador BHR contabiliza a entrada natural de água (P) e a saída (ET) no polo agrícola Petrolina/Juazeiro mas não considera as mudanças no armazenamento de água no solo, percolação nem escoamento superficial no balanço hídrico total. Estes últimos componentes são difíceis de obter em larga escala, pois demandaria definições detalhadas das características dos solos.

Valores de BHR acima de 1,00 indicam as magnitudes das possibilidades de excesso hídrico que poderiam causar percolação e escoamento superficial, dependendo da capacidade de retenção de umidade do solo, enquanto que valores próximos de zero indicam ocorrência de deficiências hídricas. Durante o ano, o período mais destacado com valores de BHR acima de 1,00 foi de DJ 033 a DJ 112, quando mesmo com elevados valores de ET, as chuvas foram elevadas. Entretanto, no final do ano, mesmo com valores inferiores de P, as baixas taxas evapotranspiratórias do período de DJ 353-365 proporcionaram BHR acima de 4,00.

Apesar de o município de Petrolina-PE ter apresentado quantidade de chuvas 10% superior a Juazeiro-BA ao longo do ano de 2015, as menores taxas da ET neste último município (84%) proporcionaram condições climáticas mais úmidas, com o valor anual de BHR 32% superior àquele para Petrolina-PE. Elevados valores de BHR trazem a atenção para as práticas de conservação da água no solo para serem evitados o escoamento superficial e percolação. Mais possibilidade de

excesso hídrico na época chuvosa é verificada no município de Juazeiro-BA, enquanto que no município de Petrolina-PE maior quantidade de água de irrigação é requerida para as culturas agrícolas mesmo com maiores quantidades de chuvas.

O indicador ETr em culturas agrícolas bem irrigadas é conhecido com coeficiente de cultura – K_c , podendo ser usado para estimativa dos requerimentos hídricos em diferentes escalas espaciais (Allen *et al.*, 1998). Em vegetação Natural pode ser usado para caracterização do grau de estresse hídrico das plantas (Lu *et al.*, 2011). Na Figura 5 é clara a tendência similar de ETr com BHD, ambos apresentando maiores valores na estação chuvosa, porém com diferença de resposta. Esta diferença está relacionada com o tempo de ocorrência das chuvas e a umidade remanente no solo, indicando que ETr determinado pela aplicação do algoritmo SAFER com as imagens MODIS pode ser útil para o monitoramento das condições de umidade na zona das raízes dos agros-ecossistemas em larga escala.

Zhang *et al.* (2012) estudando desertos temperados na Mongólia, China, reportaram valores médios diários de ETr entre 0,16 e 0,75, ligeiramente superiores aos do estudo corrente. Entretanto Lu *et al.* (2011), na mesma região chinesa, encontraram valores maiores que 1,00 para seis diferentes ecossistemas, similares apenas em culturas bem irrigadas da nossa região de estudo. Zhou e Zhou (2009) concluíram que temperatura e umidade do ar juntamente com a energia disponível foram as variáveis importantes nos valores de ETr. No atual estudo, a maior influência nos altos valores de ETr foi a concentração de chuvas no primeiro semestre do ano. Embora esta dependência sendo consistente com relação a outros ambientes (Yamanaka *et al.*, 2007; Lu *et al.*, 2011), os valores de ETr em ecossistemas naturais também estão relacionados com o regulamento da abertura dos estômatos e com a adaptação das plantas às condições de estresse hídrico (Mata-González *et al.*, 2005).

Através das análises dos indicadores de umidade do solo, nota-se claramente que para a agricultura no polo Petrolina/Juazeiro, a irrigação é necessária principalmente no segundo semestre do ano, mas que a água da chuva pode ser aproveitada com técnicas de armazenamento no primeiro semestre. Considerando todas as áreas dos dois municípios e todo o ano de 2015, de acordo com o indicador ETr, a ET representou apenas 13 e 12% da demanda atmosférica nos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, respectivamente. Considerando a importância para o desenvolvimento rural e as atuais condições de escassez hídricas a aplicação de irrigação suplementar juntamente com técnicas de armazenamento de água deveriam ser estimuladas, principalmente para as culturas que apresentem melhor produtividade da água.

CONCLUSÕES

O uso conjunto de parâmetros obtidos de imagens MODIS e dados climáticos permitiram a aplicação de indicadores do balanço hídrico ao longo do ano de 2015 na mistura de agro-ecossistemas do polo agrícola Petrolina/Juazeiro, Nordeste do Brasil. Estes indicadores podem subsidiar um melhor entendimento da dinâmica das variáveis hídricas, relevante para apreciação do impacto das condições atuais de escassez hídrica no balanço hídrico em larga escala. Com esta contabilidade nos municípios de Petrolina e Juazeiro, pôde-se concluir que Juazeiro apresenta condições naturais mais úmidas.

Foi demonstrado que as condições hídricas atuais podem ser analisadas a partir de medições instantâneas apenas das reflectâncias nas faixas de comprimento de onda no vermelho e no infravermelho próximo do sensor MODIS através da modelagem da razão da evapotranspiração atual para a de referência no momento da passagem do satélite. A combinação de produtos MODIS com estações climáticas se apresentaram muito úteis para o monitoramento dos parâmetros hídricos em larga escala, podendo contribuir para políticas de contorno dos problemas de escassez hídrica no Nordeste do Brasil. Estas ferramentas podem ser operacionalmente implementadas para o monitoramento dos impactos da intensificação da agricultura irrigada e para geração de critérios de expansão da agricultura dependente de chuvas. As limitações dos resultados das imagens MODIS devido à baixa resolução da banda termal de 1km foram contornadas estimando-se a temperatura da superfície como resíduo no balanço de radiação, permitindo resultados com resoluções espaciais de 250m.

AGRADECIMENTOS: Ao CNPq, pelo suporte financeiro aos projetos sobre produtividade da água no Brasil.

BIBLIOGRAFIA

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy.

CAI, X.; MCKINNEY, C.; LASDON, S. (2002). "A framework for sustainable analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin". *Water Resources Research* 38, pp. 21–24.

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.; WILSKE, 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.

MATA-GONZÁLEZ, R.; MCLENDON, T.; MARTIN, D.W. (2005). "The inappropriate use of crop transpiration coefficients (K_c) to estimate evapotranspiration in arid ecosystems: a review". *Arid Land Research Management* 19, pp. 285–295.

TEIXEIRA, A.H. de C.; BASTIAANSEN, W.G.M.; AHMAD, M-UD-D; BOS, M.G.; MOURA, M.S.B. (2008) "Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil". *Journal of Hydrology* 362, pp. 110–127.

TEIXEIRA, A.H. de C. (2009). *Water productivity assessments from field to large scale: a case study in the Brazilian semi-arid region*; LAP Lambert Academic Publishing: Saarbrücken, Germany, 226p.

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 Carolina Bilibio, Oliver Hensel e Jeferson Selbach. 1ed. Kassel: University of Kassel, v. 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.

TEIXEIRA, A.H. de C.; LEIVAS, J.F. ; ANDRADE, R.G. ; VICTORIA, D. de C. ; BOLFE, E.L.; SILVA, G.B. (2015) . "Water balance indicators from MODIS images and agrometeorological data in Minas Gerais state, Brazil". *Proceedings of SPIE* 9637, pp. 963700-1-963700-14, 2015.

YAMANAKA, T.; KAIHOTSU, I.; OYUNBAATAR, D.; GANBOLD, T. (2007) "Summer time soil hydrological cycle and surface energy balance on the Mongolian steppe". *Journal of Arid Environments* 69, pp. 65–79.

ZHANG, F.; ZHOU, G.; WANG, Y.; YAN, F.; CHRISTER NILSSON, C. (2002). "Evapotranspiration and crop coefficient for a temperate desert steppe ecosystem using eddy covariance in Inner Mongolia, China," *Hydrological Processes* 26, pp. 379–386.

ZHOU, L.; ZHOU, G. (2009). "Measurement and modeling of evapotranspiration over a reed (*Phragmites australis*) marsh in Northeast China". *Journal of Hydrology* 372, 41–47.