

Indicadores hídricos para a cultura da cana-de-açúcar obtidos com imagens MODIS e dados agrometeorológicos no Estado de São Paulo

Antônio Heriberto de Castro Teixeira¹
Ricardo Guimarães Andrade¹
Janice Freitas Leivas¹
Carlos Cesar Ronquim¹
Daniel de Castro Victoria¹

¹Embrapa Monitoramento por Satélite - CNPM/Embrapa
CEP - 13070-115 - Campinas - SP, Brasil
{heriberto.teixeira, ricardo.andrade, janice.leivas, carlos.ronquim,
daniel.victoria}@embrapa.br

Abstract. The Northeastern side of São Paulo state has been highlighted by large áreas with sugar cane. Taking into account the land use change, the visible and infra red bands of the MODIS sensor were coupled with agrometeorological data for quantifying water indicators throughout a generalized growing cycle from September 2011 to October 2012. During the four characterized crop stages, the mean values of actual evapotranspiration (ET) ranged from 0.6 to 4.0 mm day⁻¹. Biomass production (BIO) averaged values were between 20 and 200 kg ha⁻¹, resulting in water productivity values from 2.8 to 6.0 kg m⁻³. Soil moisture indicators based on ET, reference evapotranspiration (ET₀) and precipitation (P), were applied indicating probable benefices of supplementary irrigation during the phase of active growth. The main results, with quantification of the large-scale water variables may subsidize the rational management of the water resources under the conditions of fast climate and land changes promoted by the sugar cane crop expansion in areas in São Paulo state with climatic aptitude.

Palavras-chave: remote sensing, evapotranspiration, biomass production, sensoriamento remoto, evapotranspiração, produção de biomassa.

1. Introdução

No Brasil, a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) vem se expandindo, tanto para produção de açúcar como de álcool, mas com perspectivas para a geração de energia renovável (Mello e Esperancini, 2012). Na região nordeste do Estado de São Paulo, rápidas mudanças de uso da terra vêm ocorrendo nas últimas décadas com a introdução da cultura. Embora com as vantagens das condições climáticas e grande quantidade de recursos hídricos do Estado, o cultivo requer grandes quantidades de água, promovendo a competição com outros setores nas atuais condições de escassez hídrica. Por outro lado, os efeitos negativos dessa mudança de uso da terra, em áreas ocupadas previamente por vegetação natural, citros, grãos e café (Rudorf et al., 2010), podem ser mais prejudiciais do que aqueles ocasionados pela exploração de combustíveis fósseis, com relação às emissões de gases de efeito estufa (Scharlemann et al., 2008).

O cultivo de fontes de biomassa para substituição dos combustíveis fósseis acarreta em uma maior demanda dos recursos hídricos (Chooyok et al., 2013), alterando as magnitudes dos componentes dos balanços de energia e de água em larga escala (Cerri et al., 2011). Anderson-Teixeira et al. (2012) suportam este problema reportando um aumento nas taxas evapotranspiratórias como consequência da expansão da cana-de-açúcar. A produção de etanol através pode também afetar a qualidade dos recursos hídricos. Gunkel et al., 2007 analisando amostras à jusante de destilarias reportaram aumento da temperatura da água, da condutividade elétrica, do carbono orgânico dissolvido e do nitrogênio orgânico dissolvido.

As dificuldades de se medir e analisar as alterações nos balanços de energia e de água em larga escala com apenas medições de campo, traz a importância do sensoriamento remoto por

imagens de satélites em conjunto com dados agrometeorológicos. Estas ferramentas vêm sendo utilizadas em culturas energéticas com sucesso sob diferentes condições climáticas (Rudorff et al., 2010; Claverie et al., 2012; Adak et al., 2013; Teixeira et al., 2014).

Dispondo-se de uma máscara agrícola para a cana-de-açúcar, o algoritmo SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving) foi aplicado para a obtenção da evapotranspiração atual (ET) em áreas produtoras na região nordeste do Estado de São Paulo. O modelo da radiação de Monteith foi usado para a obtenção da produção de biomassa (BIO) e a produtividade da água (PA) foi analisada em termos da razão da BIO para a ET (Teixeira et al., 2014). Através da união destes modelos e com dados provenientes de uma rede de estações agrometeorológicas e imagens MODIS, quantificaram-se os indicadores hídricos para a cultura. Os resultados fornecem subsídios para um manejo racional dos recursos hídricos nas atuais condições de escassez de água em conjunto com mudanças climáticas e de uso da terra, adicionando confiança para calibrações e validações dos modelos em outros ambientes cultivados com a cultura.

2. Material de Trabalho

A Figura 1 apresenta a localização das estações agrometeorológicas envolvendo a máscara agrícola nas mesorregiões produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.

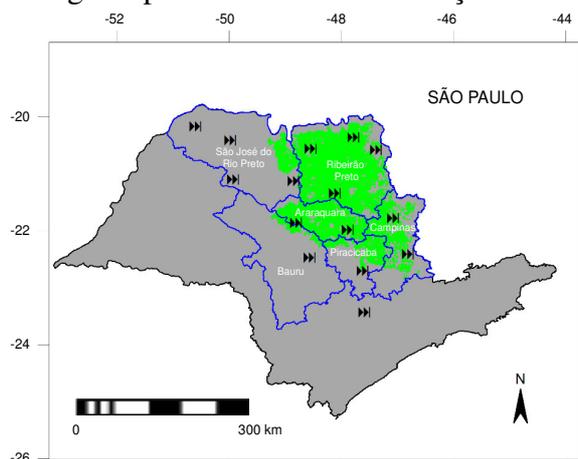


Figura 1. Localização das mesorregiões produtoras da cana-de-açúcar, máscara agrícola e estações agrometeorológicas (setas pretas) utilizadas no processo de interpolação dos dados climáticos.

24 Imagens MODIS foram usadas em conjunto com as 15 estações agrometeorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As equações para a modelagem da ET e da BIO são escritas em detalhes em Teixeira et al. (2014) sendo resumidas a seguir.

O albedo da superfície (α_0) foi calculado como:

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

onde α_1 e α_2 são as reflectâncias das bandas 1 e 2 extraídas do produto MODIS MOD13Q1, na escala de tempo de 16 dias e a, b e c são os coeficientes de regressão.

A temperatura da superfície (T_s) foi obtida como:

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{R_G - \alpha_0 R_G + \varepsilon_A \sigma T_a^4 - R_n}{\varepsilon_S \sigma}} \quad (2)$$

onde R_G e T_a são respectivamente os valores diários da radiação solar global e temperatura média do ar provenientes das estações, R_n é o saldo de radiação diário, ε_A e ε_S são

respectivamente as emissividades da atmosfera e da superfície obtidos em função do índice da diferença de vegetação normalizado (NDVI).

Os valores diários de R_n foram obtidos pela seguinte equação:

$$R_n = (1 - \alpha_0)R_G - a_L \tau_{sw} \quad (3)$$

onde a_L é um coeficiente de regressão da relação entre o saldo de radiação de ondas longas e transmissividade atmosférica (τ_{sw}) na escala diária.

O algoritmo SAFER foi usado para modelagem da ET em larga escala:

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a_s + b_s \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \quad (4)$$

onde ET_0 é evapotranspiração de referência (Allen et al., 1998) e a_s e b_s são coeficientes de regressão.

A produção de biomassa (BIO) foi quantificada como:

$$BIO = \varepsilon_{max} E_f APAR 0.864 \quad (5)$$

onde ε_{max} é a máxima eficiência de uso da luz, E_f é a fração evaporativa, APAR é a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida e 0,964 é um fator de conversão.

3. Resultados e Discussão

Ao serem processados os parâmetros hídricos e de vegetação, considerando-se a máscara agrícola da Figura 1, percebeu-se nitidamente um ciclo generalizado da cana-de-açúcar concentrado entre o final de setembro de 2011 e o final de outubro de 2012. Isto levou a consideração das análises envolvendo este período de estudo.

Os totais de precipitação (P) e de evapotranspiração de referência (ET_0) juntamente com as médias diárias da radiação solar global incidente (R_G) são apresentados na Figura 2.

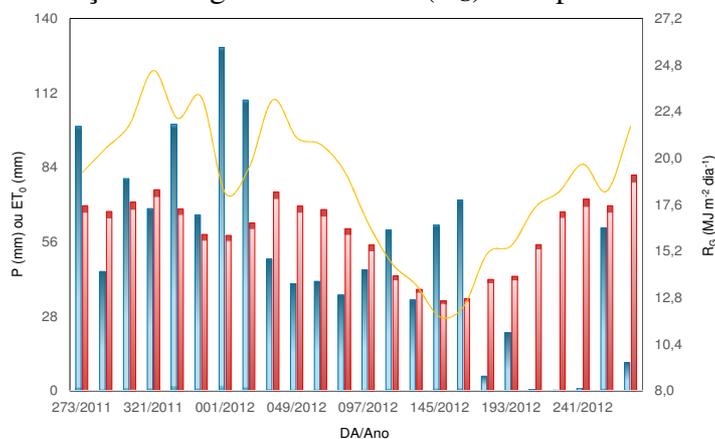


Figura 2. Valores médios de radiação solar global incidente (R_G) e totais de evapotranspiração de referência (ET_0) e precipitação (P) durante o período de setembro de 2011 a outubro de 2012, nas áreas produtoras de cana-de-açúcar do Nordeste de São Paulo, Brasil. Médias dos pixels da máscara agrícola foram consideradas e DA significa Dia do Ano.

Havendo elevados níveis de R_G e boas condições de umidade edáfica, a cultura da cana-de-açúcar produzirá elevadas taxas de ET e BIO, dependendo do estado fenológico da cultura. De acordo com Thieres et al. (2011), as fases da cultura podem ser divididas em 4 fases; a Fase 1 sendo de brotação e estabelecimento, a Fase 2 de estabelecimento e perfilhamento, a Fase 3 de crescimento máximo, e a Fase 4 a de maturação.

Pela Figura 2, percebe-se que os maiores valores de ambos R_G e ET_0 , ocorreram entre as Fase 2 e 3, de novembro (DA 321/2011) ao início de abril (DA 097/2012). Neste período R_G atinge taxas acima de $20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, promovendo taxas de ET_0 maiores que $4,5 \text{ mm dia}^{-1}$. As chuvas, com um total de 1240 para o ciclo generalizado da cultura, foram bem distribuídas

ao longo dos estágios fenológicos, com um curto período seco apenas do final de junho ao final de agosto (DA 177 a 257 de 2012), correspondendo a fase dominante de crescimento máximo (Fase 3), o que pode ter causado alguma deficiência hídrica para a cultura neste estágio de grande requerimento hídrico.

A Figura 3 mostra as distribuições espaciais dos valores médios da ET diária nas áreas produtoras de cana-de-açúcar para períodos específicos de 16 dias, em termos de Dia do Ano (DA), durante o ciclo generalizado de 2011 a 2012.

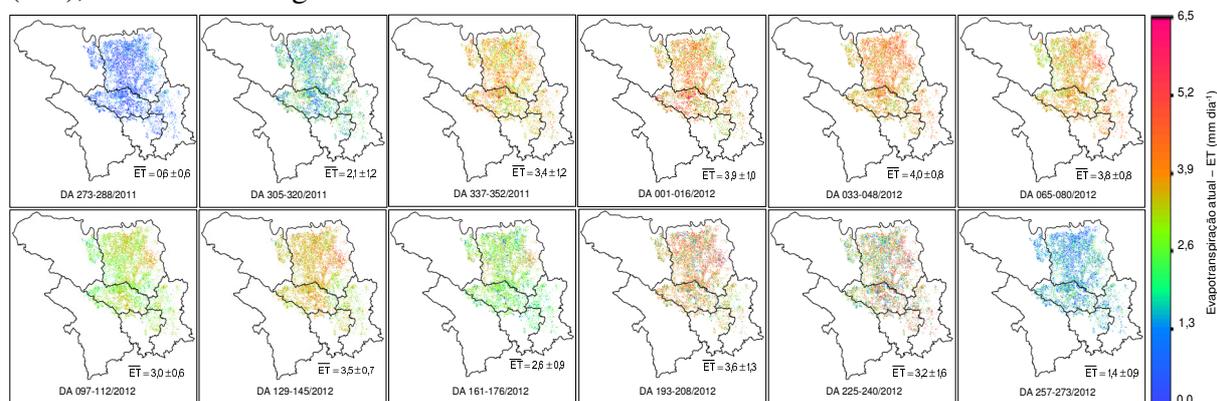


Figura 3. Distribuição espacial dos valores médios da evapotranspiração atual (ET) diária, para períodos específicos de 16 dias, durante o ciclo generalizado da cana-de-açúcar de 2011 a 2012, nas áreas produtoras da região nordeste de São Paulo, Brasil.

Pela Figura 3, as variações temporais e espaciais da ET nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar são evidentes ao longo do ciclo generalizado da cultura de 2011 a 2012. Valores máximos são verificados durante o período chuvoso no início de fevereiro de 2012, quando a média dos pixels foi de 4,0 mm dia⁻¹ (DA 033/2012), na fase geral de crescimento máximo da cultura. As taxas mais baixas, inferiores de 1,5 mm dia⁻¹ aconteceram nas fases de brotação e estabelecimento (DA 273-305 de 2011) e de maturação, da segunda quinzena de setembro (DA 257/2012) a primeira quinzena de outubro (DA 281/2012).

Os valores médios da ET estiveram entre 0,6 e 4,0 mm dia⁻¹, com média de 3,0 mm dia⁻¹ para todo o ciclo generalizado. De acordo com Scarpere (2011), o porte das plantas e as diferentes variedades são responsáveis pela larga variação do consumo hídrico. Os valores médios dos pixels da Figura 3 estão acima daqueles reportados por Eksteen et al. (2014), entre 1,6 a 2,9 mm dia⁻¹, envolvendo diferentes variedades e condições de irrigação. Considerando o valor total da ET para o ciclo generalizado de 400 dias no presente estudo, este foi de 1180 mm. Estudo prévio sobre o consumo hídrico da cana-de-açúcar em condições de irrigação em Everglades, Flórida (USA) realizado por Omary e Izuno (1995), apresenta taxas mínimas diárias da ET de 0,7 a 1,5 mm dia⁻¹ e máximos de 4,5 a 4,6 mm dia⁻¹, resultando em um total para o ciclo produtivo de 1060 mm. Os resultados similares ao da Flórida do estudo corrente fornecem confiança na aplicação do SAFER com imagens MODIS sem a banda termal, nas áreas produtoras de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo.

A Figura 4 apresenta as distribuições espaciais dos valores quinzenais médios da BIO diária nas áreas produtoras de cana-de-açúcar, para períodos específicos de 16 dias, em termos de Dia do Ano (DA) durante o ciclo generalizado de 2011 a 2012.

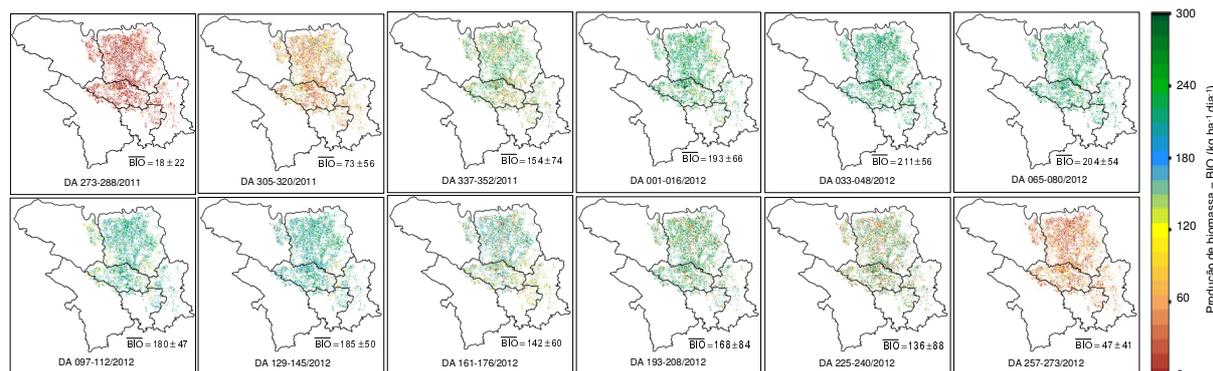


Figura 4. Distribuição espacial dos valores médios da produção de biomassa (BIO) diária, para períodos específicos de 16 dias durante o ciclo generalizado de 2011 a 2012, nas áreas produtoras de cana-de-açúcar da região nordeste de São Paulo, Brasil.

Como existe uma relação entre a ET e a BIO (Teixeira et al., 2014), os períodos com maiores valores da BIO na cana-de-açúcar, são os mesmos que os para a ET, do início de fevereiro (DA 033/2012) ao início de abril (DA 097/2012), com valores médios dos pixels acima de $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. As menores taxas da BIO ocorreram nas fases gerais de brotação e estabelecimento (DA 273-305 de 2011), e de maturação da segunda quinzena de agosto (DA 257-281/2012 a), inferiores a $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

As chuvas, em geral, favoreceram a BIO provendo boa quantidade de umidade na zona das raízes da cultura da cana-de-açúcar, em todas as fases fenológicas. O curto período com baixas precipitações, mesmo com incremento da demanda atmosférica observada pelos valores de ET_0 , não reduziu significativamente a BIO (ver Figuras 1 e 4). Entretanto, como no caso da ET, um declínio nos valores da BIO é observado na transição das fases generalizadas de crescimento ativo para a maturação. Oliver e Singels (2003) reportaram grande redução na produção da cana-de-açúcar quando a irrigação foi reduzida em 50%, dependendo da variedade. Entretanto, Andrade et al. (2014) afirmam que os efeitos climáticos na BIO pode variar com as distintas épocas de plantio e de corte.

Eksteen et al.(2014) encontraram valores inferiores da BIO com relação ao estudo corrente, entre 23.6 a 42.4 t ha^{-1} , para dois tipos de variedades da cana de açúcar sob diferentes condições de irrigação na África do Sul. Por outro lado, em Minas Gerais, Brasil, Andrade et al. (2014) reportaram valores medidos em áreas irrigadas mais próximos aos do nordeste de São Paulo, na faixa de 100 a 160 t ha^{-1} . Elevação da BIO pode ser obtida através da melhora de uso dos recursos naturais, principalmente radiação solar e água, e/ou no aumento da eficiência da captura destes recursos (Eksteen et al., 2014).

Como indicadores de umidade do solo, além da ET e da BIO, os valores médios dos pixels para as razões da ET para ET_0 e da precipitação (P) para a ET juntamente com a produtividade da água (PA) foram consideradas nas análises. A Figura 5 apresenta a tendência destes indicadores ao longo do ciclo generalizado da cultura da cana-de-açúcar, em termos de Dia do Ano (DA).

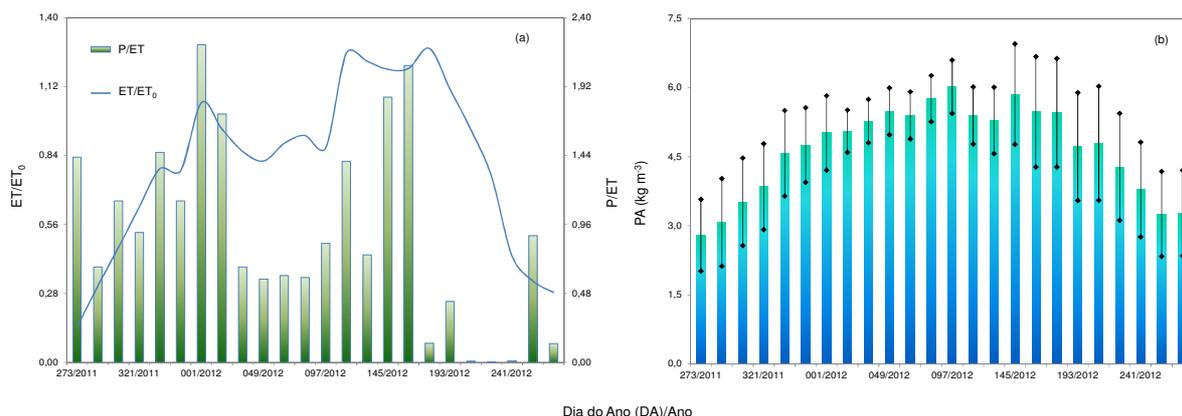


Figura 5. Indicadores hídricos para a cultura da cana-de-açúcar, para períodos de 16 dias, na região nordeste do Estado de São Paulo. (a) razões da evapotranspiração atual (ET) para a de referência (ET_0) e da precipitação (P) para a ET; (b) produtividade da água (PA) juntamente com os desvios padrões indicados por barras pretas.

Declínios na tendência da curva de ET/ET_0 aconteceram durante o período entre DA 017 a 113 de 2012, porém não inferiores a 0,80 (Figura 5a). Os valores mais elevados, acima de 1,20 durante fase de crescimento ativo, aconteceram entre os DAs 113 e 145 de 2012, da segunda quinzena de abril a segunda quinzena de maio de 2012. A razão ET/ET_0 sob boas condições de irrigação é considerada como o coeficiente de cultura - K_c (Allen et al., 1998), utilizado no manejo da irrigação. Valores de K_c para a cana-de-açúcar cobrindo totalmente o solo estão entre 1,1 e 1,5 dependendo das condições climáticas (Eksteen et al., 2014), tipicamente em torno 1,25 nesta fase (Allen et al., 1998, Inman e McGlinchey, 2003). Pela tendência de ET/ET_0 apresentada na Figura 5a para condições de sequeiro, percebe-se que os valores estão dentro da faixa considerada ótima para agricultura irrigada, com exceção do período de DA 017 a 113 de 2012, o que poderia acarretar em benefícios de irrigações suplementares.

Percebe-se da Figura 5a que o indicador de umidade edáfica ET/ET_0 acompanhou o indicador P/ET , porém a redução deste último não promoveu queda drástica do primeiro durante o período mais seco. A irrigação suplementar pode ser economicamente viável onde houver água disponível para este fim, especialmente com métodos eficiente como o gotejamento. Além dos benefícios diretos, com o aumento da produção, ocorrem os indiretos como a redução de cultivo em novas áreas. Em média, a ET da cana-de-açúcar representou 80% das taxas evapotranspiratórias da superfície de grama de referência e a quantidade de precipitação, em geral, atendeu bem o consumo hídrico da cultura, representando 90% da ET para todo o ciclo generalizado.

De acordo com a Figura 5b, percebe-se a evolução de valores de PA mais baixos no início do ciclo generalizado, em torno de 2,8 $kg\ m^{-3}$, elevando-se até ficar acima de 6,0 $kg\ m^{-3}$ na fase de crescimento ativo das plantas, caindo para médias de 3,3 $kg\ m^{-3}$ na fase de maturação da cana. Chooyok et al. (2013) reportaram valores de PA de 5,8 e 6,5 $kg\ m^{-3}$ para a cana-de-açúcar cultivada em duas regiões distintas na Tailândia, concluindo que, estes dependem de vários fatores tais como clima, solo e data de plantio. Por outro lado, Scarpore et al. (2012) encontraram valores mais baixos de 2,8 $kg\ m^{-3}$ para a cultura com irrigação sub superficial por gotejamento e com aplicação de nitrogênio, enquanto que com a cultura dependente de chuvas e sem aplicação de nitrogênio a PA caiu para 1,5 $kg\ m^{-3}$. Eksteen et al. (2014) na África do Sul, apresentaram valores de PA entre 5,8 e 7,8 $kg\ m^{-3}$ para variedades distintas irrigadas com diferentes lâminas de irrigação. Entretanto, de acordo com Chooyok et al. (2013), a média global da PA está em torno de 4,8 $kg\ m^{-3}$, coincidindo com os valores médios dos pixels na região para todo o ciclo generalizado do estudo corrente, o que fornece

confiança na utilização dos modelos usados para a ET e BIO com imagens MODIS e dados agrometeorológicos.

3. Conclusões

O uso conjunto de parâmetros obtidos das bandas do vermelho e infravermelho próximo das imagens MODIS em conjunto com estações agrometeorológicas, permitiu as análises de indicadores hídricos para a cana-de-açúcar dependente de chuvas na região nordeste do Estado de São Paulo, Brasil. Foi demonstrado que a união do algoritmo SAFER com o modelo da radiação de Monteith é bastante útil para determinação dos componentes da produtividade da água, independentemente da presença da banda termal nos sensores orbitais.

Através de indicadores hídricos, perceberam-se os benefícios de irrigações suplementares nas fases de crescimento ativo da cultura, embora os resultados tenham demonstrado que a cana-de-açúcar tem uma eficiência de uso de água da chuva bastante elevado nas condições ambientais das mesorregiões paulistas produtoras.

As ferramentas testadas podem ser operacionalizadas para o monitoramento da intensificação do cultivo da cana-de-açúcar e os impactos adversos causados pelas mudanças climáticas e de uso da terra. As limitações da baixa resolução de 1 km da banda termal do MODIS pela nova metodologia de estimar a temperatura da superfície como resíduo no balanço de radiação foram minimizadas, permitindo uma melhora nos resultados para uma resolução de 250m.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pelo aporte financeiro referente a projetos sobre produtividade da água; ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – Drs Daniel Alves de Aguiar e Bernardo Friedrich Theodor Rudorff, pela provisão da máscara da cultura da cana-de-açúcar, e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilidade dos dados climáticos.

Referências bibliográficas

Adak, T.; Kumar, G.; Chakravarty, N.V.K.; Katiyar, R.K., Deshmukh, P.S. Biomass and biomass water use efficiency in oilseed crop (*Brassica Inceae* L.) under semi-arid microenvironments. **Biomass and Bioenergy**, v. 51, p. 154-162, 2013.

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.

Anderson-Teixeira, K. J.; Snyder, P. K.; Twine, T. E.; Cuadra, S. V.; Costa, M. H.; de Lucia, E. H. Climate-regulation services of natural and agricultural ecoregions of the Americas. **Nature Climate Change**, v. 2, p. 177-181, 2012.

Andrade, R.G.; Sediya, G.; Soares, V.P.; Gleriani, R.G. Menezes, S.J.M.C. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar utilizando o SEBAL e imagens Landsat. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 433-442, 2014.

Cerri, C.C.; Galdos, M.V.; Maia, S.M.F.; Bernoux, M.; Feigl, B.J.; Powlson, D.; Cerri, C.E.P. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, v. 62, p. 23-28, 2011.

Choochok, P.; Pumijumnong, N.; Ussawarujikulchai, A.T. The water footprint assessment of ethanol production from molasses in Kanchanaburi and Supanburi province of Thailand. **Procedia APCBEE**, v.5, p. 283-287, 2013.

Claverie, M.; Demarez, V.; Duchemin, B.; Hagolle, O.; Ducrot, D.; Marais-Sicre, C.; Dejuoux, Jean-François; Huc, M.; Keravec, P.; Béziat, P.; Fieuzal, R.; Ceschia, E.; Dedieu, G.. Maize and sunflower biomass estimation

in southwest France using spatial and temporal resolution remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 884-857, 2012.

Eksteen, A.; Singels, A.; Ngxaliwe, S. Water relations of two contrasting sugarcane genotypes. **Field Crops Research**, v. 168, p. 86-100, 2014.

Gunkel, G.; Kosmol, J.; Sobral, M.; Rohn, H.; Montenegro, S.; Aureliano, J. Sugar cane industry as a source of water pollution-case study on the situation in Ipojuca River, Pernambuco, Brazil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 180, p. 261-269, 2007.

Inman-Bamber, N.G.; McGlinchey, M.G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, v. 83, p. 125-138, 2003.

Mello, C.O.; Esperancini, M.S.T. Análise econômica da eficiência da produção de cana-de-açúcar de fornecedores do Estado do Paraná. **Revista Energia na Agricultura**, v. 27, p. 48-60, 2012.

Oliver, F.C.; Singles, A. Water use efficiency of irrigated sugarcane as affected by variety and row spacing. **Proceedings of the South African Sugar Technologist's Association**, v. 77, p. 347-351, 2003.

Omary, M.; Izuno, F.T. Evaluation of sugar-cane evapotranspiration from water table data in the everglades agricultural area. **Agricultural Water Management**, v. 27, p. 309-319, 1995.

Rudorf, B.F.T.; Aguiar, D.A.; Silva, W.F.; Sugawara, L.M.; Adami, M.; Moreira, M.A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1057-1076, 2010.

Scarpate, F.V. **Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST**. 2011. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2011.

Scharlemann, J. P.; Laurance, W. F. How Green Are Biofuels? **Science**, v. 319, p. 43-44, 2008.

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, 2014.

Thieres, G.F. da S.; Moura, M.S.B.; Zolnier, S.; Soares, J.M.; Vieira, V.J.de S.; Júnior, W.F.G. Demanda hídrica e eficiência do uso da água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 12, p. 1257-1265, 2011.