

OBTENDO VARIÁVEIS DE PRODUTIVIDADE DA ÁGUA EM LARGA ESCALA NO MUNICÍPIO DE JUAZEIRO, BRASIL.

Antônio Heriberto de Castro Teixeira^{1} & Morris-Scherer Warren² & Fernando Braz Tangerino Hernandez³ & Ricardo Guimarães Andrade¹*

Resumo – Objetivando subsidiar o manejo racional dos recursos hídricos em Juazeiro-BA, os valores em larga escala da produção de biomassa (BIO), evapotranspiração (ET) e produtividade da água (PA) foram quantificados em larga escala. O modelo de Monteith foi aplicado para a estimativa da BIO, enquanto que o algoritmo SAFER (“Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving”) foi usado na obtenção da ET. A PA foi então analisada como a razão da BIO para a ET em escala mensal com imagens MODIS e dados climáticos do ano de 2011. O período com maiores valores da PA foi de março a maio tanto para culturas irrigadas como para condições sem irrigação. Entretanto, maior uniformidade ocorreu em vegetação natural, evidenciados pelos menores desvios padrões, quando comparados com os correspondentes para culturas irrigadas, devidos aos diferentes estágios destas culturas e manejos culturais e de irrigação. Os modelos testados na atual pesquisa são considerados viáveis para investigações dos efeitos das mudanças climáticas e de uso da terra nas variáveis de produtividade da água em larga escala.

Palavras-Chave – evapotranspiração; produção de biomassa; resistência da superfície.

DERIVING THE LARGE SCALE WATER PRODUCTIVITY VARIABLES IN THE JUAZEIRO MUNICIPALITY, BRAZIL.

Abstract – Aiming to subsidise the rational water resource management in Juazeiro-BA, the large scale values of biomass production (BIO), evapotranspiration (ET) and water productivity (WP) were quantified. Monteith’s model was applied for estimating BIO, while the SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving) algorithm was used to retrieve ET. WP was then analysed by the ratio of BIO by ET on a monthly time scale with MODIS satellite images together with weather data for the year of 2011. The period with the highest values for the WP values was from March to May for both irrigated and rain fed conditions. However, more uniformity occurred in natural vegetation, evidenced by the lower standard deviations when comparing to the corresponding ones for irrigated crops, due to the different crop stages, cultural and irrigation managements. The models tested in the current research are considered suitable for quantifying the climate and land use changes large scale effects on the water productivity variables.

Keywords – evapotranspiration; biomass production; surface resistance.

INTRODUÇÃO

O município de Juazeiro, situado no Nordeste do Brasil, Estado da Bahia, se tornou uma importante região agrícola. A intensificação da agricultura vem causando uma rápida mudança da cobertura da terra. Nestas situações, estimativas em larga escala da produção de biomassa (BIO), evapotranspiração (ET) e produtividade da água (PA) são relevantes. As principais ferramentas para estas estimativas incluem o sensoriamento remoto por imagens de satélites (Teixeira, 2009).

¹ Embrapa Monitoramento por Satélites: heriberto.teixeira@embrapa.br & ricardo.andrade@embrapa.br.

² Agência Nacional das Águas: morris@ana.gov.br.

³ Universidade do Estado de São Paulo: fbtatang@agr.feis.unesp.br.

*Autor Correspondente: heriberto.teixeira@embrapa.br.

As altas correlações entre as radiações espectrais e os parâmetros de vegetação contribuem para o fornecimento de informações de parâmetros biofísicos em larga escala (Ahamed et al., 2011). Dados do sensor MODIS foram processados em conjunto com parâmetros climáticos para o mapeamento da BIO em floresta na Califórnia (Baccine et al., 2004). Estimativas da BIO foram também realizadas com imagens MODIS em Guandong, China, para avaliação do estabelecimento de plantas bioenergéticas (Shi et al., 2008). No Brasil, estas foram realizadas na bacia do Rio São Francisco (Teixeira, 2009) e na Amazônia (Lu, 2005) com o uso de imagens Landsat.

O modelo para estimativa da BIO baseado em dados de radiação solar global (RG) e no desenvolvimento da vegetação proposto por Monteith tem precisão aceitável (Monteith, 1972), podendo ser usado com dados de satélites para quantificação da variação espacial e temporal da BIO em ecossistemas mistos (Bastiaanssen et al., 2003; Teixeira, 2009). Além de estimativas da BIO, há necessidade de quantificação da ET para se chegar na PA, a qual pode ser considerada como sendo a razão da BIO para a ET.

O algoritmo SAFER – *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* (Teixeira, 2012a) foi aplicado na estimativa da ET em larga escala. Um modelo biofísico para a obtenção da resistência da superfície aos fluxos hídricos (r_s), foi usado na separação das culturas irrigadas e vegetação natural (Teixeira, 2012b). O objetivo deste trabalho foi combinar o modelo de Monteith com o algoritmo SAFER na quantificação da PA para análise espacial e temporal deste parâmetro no município de Juazeiro envolvendo ecossistemas mistos contendo vegetação natural (Caatinga) e culturas irrigadas.

MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta as localizações do município de Juazeiro, Estado da Bahia (BA), Nordeste do Brasil, e das estações agrometeorológicas utilizadas.

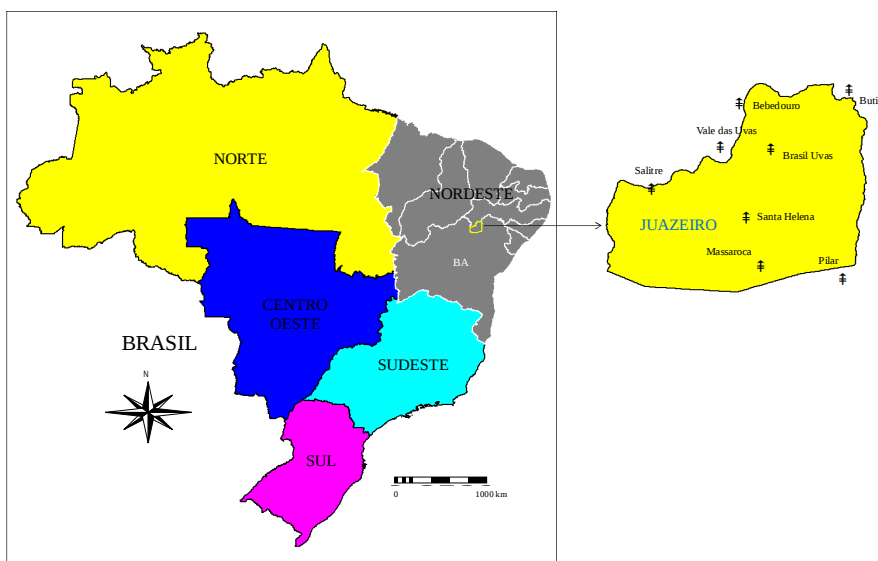


Figura 1 – Localização do município de Juazeiro, Estado da Bahia, Brasil, e estações agrometeorológicas utilizadas no processo de interpolação.

Imagens MODIS, sendo seis de 2010 e nove para 2011 em conjunto com oito estações agrometeorológicas foram usadas com procedimentos de calibrações e interpolações. Medições de balanço de energia de 2002 e 2004 (Teixeira, 2009) foram usadas no desenvolvimento de equações

de regressão para o albedo da superfície (α_0) e para a temperatura da superfície (T_0). As bandas 1 e 2 com resolução de 250m foram usadas para α_0 e as bandas 31 e 32 de resolução de 1000m para T_0 :

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

onde $\alpha_{p(1)}$ e $\alpha_{p(2)}$ são os albedos planetários nas bandas 1 e 2 medidas pelo sensor MODIS e a, b e c são coeficientes de regressão. Os valores destes coeficientes encontrados foram de 0,08, 0,41 e 0,14, respectivamente.

$$T_0 = aT_{31} + bT_{32} \quad (2)$$

onde T_{31} e T_{32} são as temperaturas de brilho para as bandas 31 e 32 e os coeficientes de regressão foram igualmente 0,50 para as condições semiáridas brasileiras.

Com as imagens de α_0 , T_0 e NDVI, o algoritmo SAFER foi aplicado para o cálculo da ET através da equação:

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[a + b \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \quad (3)$$

onde ET_0 é a evapotranspiração de referência e a e b são os coeficientes de regressão, os quais foram 1,8 e 0,008 para as condições semiáridas brasileiras respectivamente (Teixeira, 2012a).

Os valores diários do saldo de radiação (R_n) foram obtidos através da equação de Slob:

$$R_n = (1 - \alpha_0)R_G - a_1\tau \quad (4)$$

Onde a_1 é o coeficiente de regressão entre saldo de radiação de ondas longas e a transmissividade atmosférica τ na escala diária. Uma equação de regressão entre a_1 e a temperatura do ar (T_a) foi usada para espacialização deste coeficiente (Teixeira, 2009).

Os mapas diários de radiação solar global (R_G) foram usados para estimativa dos valores da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em larga escala:

$$PAR = aR_G \quad (5)$$

onde $a = 0,44$ é o coeficiente de regressão encontrado nas condições semiáridas brasileiras (Teixeira, 2009).

A radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) foi estimada da PAR:

$$APAR = fPAR \quad (6)$$

sendo os valores de f obtidos dos de NDVI:

$$f = aNDVI + b \quad (7)$$

considerando-se os coeficientes de regressão a e b como 1,257 e -0,161, respectivamente, de acordo com Bastiaanssen e Ali (2003).

BIO foi estimada através da seguinte equação:

$$BIO = \varepsilon_{\max} E_f APAR 0.864 \quad (8)$$

onde E_f (fração evaporativa) é a razão do fluxo de calor latente (λE) para R_n , sendo λE obtido pela transformação da ET em unidades de energia; $\varepsilon_{\max}$ é a eficiência de uso da luz máxima, a qual foi considerada $2,5 \text{ g MJ}^{-1}$ pela maioria das espécies sendo C4 na região de estudo; e 0,864 é um fator de conversão (Teixeira, 2009).

Nas análises da PA envolvendo tanto culturas irrigadas como vegetação natural, a equação seguinte foi aplicada (Teixeira e Bassoi, 2009):

$$PA = \frac{BIO}{ET} \quad (9)$$

Para a classificação em culturas irrigadas e vegetação natural, o modelo seguinte foi usado para uma imagem do período mais seco do ano (Teixeira, 2012b):

$$r_s = \exp \left[a \left(\frac{T_0}{\alpha_0} \right) (1 - NDVI) + b \right] \quad (10)$$

onde a e b são coeficientes de regressão, com valores de 0,04 e 2,72, respectivamente, nas condições semiáridas do Brasil. Aplicaram-se os limites de 800 s m^{-1} e 15000 s m^{-1} para r_s . Para valores abaixo ou igual ao limite inferior e NDVI acima de zero consideraram-se culturas irrigadas. Para r_s acima de 800 s m^{-1} e menor que o limite superior do intervalo, assumiu-se vegetação natural.

Quando ao longo do ano de 2011 analisado não havia imagens livres de nuvens, as imagens ET/ET₀ e NDVI do ano de 2010 com dados climáticos de 2011 foram usadas para cobrir as lacunas, e sucessivas interpolações foram feitas até haver no mínimo três imagens para cada mês. A imagem média para um mês foi então usada com as grades dos valores mensais de R_G, T_a e ET₀ resultantes dos dados das oito estações mostradas na Figura 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como fatores climáticos mais importantes para as variáveis biofísicas são a R_G e a precipitação (P), primeiramente o comportamento mensal destes parâmetros durante o ano de 2011 foram analisados (Figura 2). Para este propósito os dados usados foram o da estação agrometeorológica mais central de Santa Helena (ver Figura 1).

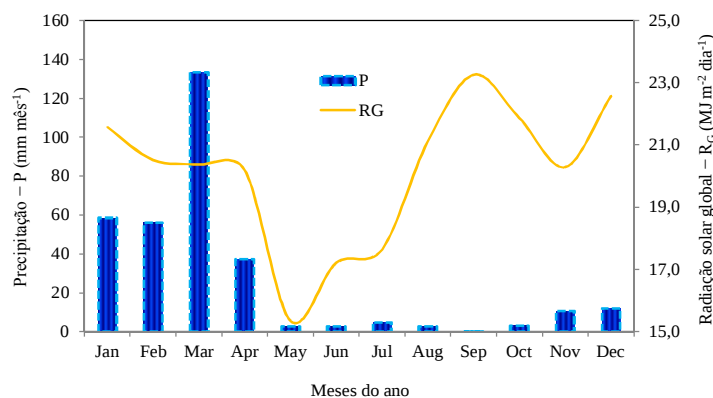


Figura 2 – Médias mensais da radiação solar global (RG) e totais de precipitação (P) correspondentes, durante o ano de 2011, no município de Juazeiro, Estado da Bahia (BA), Brasil.

Tendo umidade do solo e níveis de R_G suficientes, ambos, a vegetação natural e as culturas irrigadas produzirão largas quantidades de biomassa. Para a Caatinga estas melhores condições acontecem em abril, enquanto que para culturas irrigadas estas são em setembro, já que o crescimento das plantas não é dependente das chuvas. Para o ano de 2011 o total de P foi de

325 mm, 57% do total histórico registrado em uma estação convencional situada em Mandacaru, entre as estações de Santa Helena e Vale das Uvas no município de Juazeiro (ver Figura 1).

Elevados níveis de R_G aconteceram nos primeiros e últimos quatro meses do ano. Durante o segundo semestre a quantidade de chuvas é menor e o rápido aumento de R_G é apropriado para o início dos ciclos produtivos das culturas irrigadas. No meio do ano, as condições naturalmente mais secas e os baixos níveis de energia disponível são menos favoráveis para a BIO e ET, considerando ambos os ecossistemas, irrigado e natural.

A Figura 3 apresenta a variação espacial dos valores mensais da BIO no município de Juazeiro, ao longo do ano de 2011.

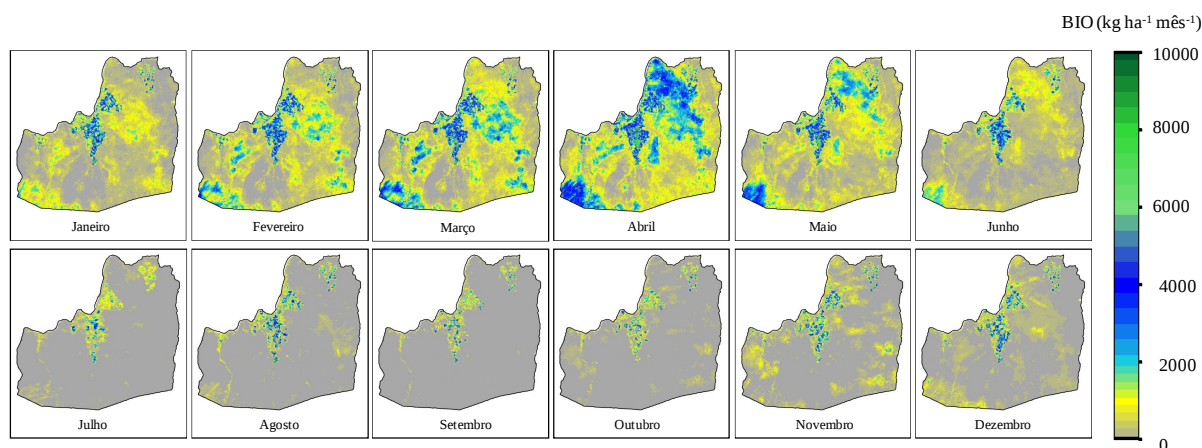


Figura 3 – Distribuição espacial dos valores mensais de produção de biomassa (BIO) para os ecossistemas mistos durante o ano de 2011, no município de Juazeiro, Estado da Bahia, Brasil.

A variação espacial e temporal da BIO é evidente, principalmente quando se compara o período mais úmido de fevereiro a maio com o mais seco de julho a outubro. O valor médio mensal máximo de $1306 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ ocorre em abril. Entretanto pixels com os mais elevados valores, acima de $7000 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ ocorrem em agosto, representando parcelas agrícolas bem irrigadas. Por outro lado, o valor médio mensal mínimo de $92 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ aconteceu no mês de setembro. As precipitações no período de janeiro a abril fornecem suficiente umidade na zona das raízes das espécies da Caatinga, enquanto que de junho a setembro as culturas irrigadas são bem destacadas da vegetação natural. Após este período as chuvas reiniciam lentamente e R_G aumenta desde julho como uma consequência do movimento aparente do sol que chega à posição zenital com baixa cobertura de nuvens no céu (ver Figura 2). Para todo o ano, o valor médio da BIO foi de $5,9 \pm 7,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. De acordo com estudos prévios com imagens Landsat, as faixas dos valores mais frequentes da BIO no semiárido brasileiro foram entre $14,0$ a $34,0 \text{ t ha}^{-1}$ (Teixeira, 2009) maiores que a média para Juazeiro-BA, evidenciando menor desenvolvimento da vegetação no ano de 2011 para este município.

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial dos valores mensais da ET para o ano de 2011, no município de Juazeiro, Estado da Bahia, Brasil.

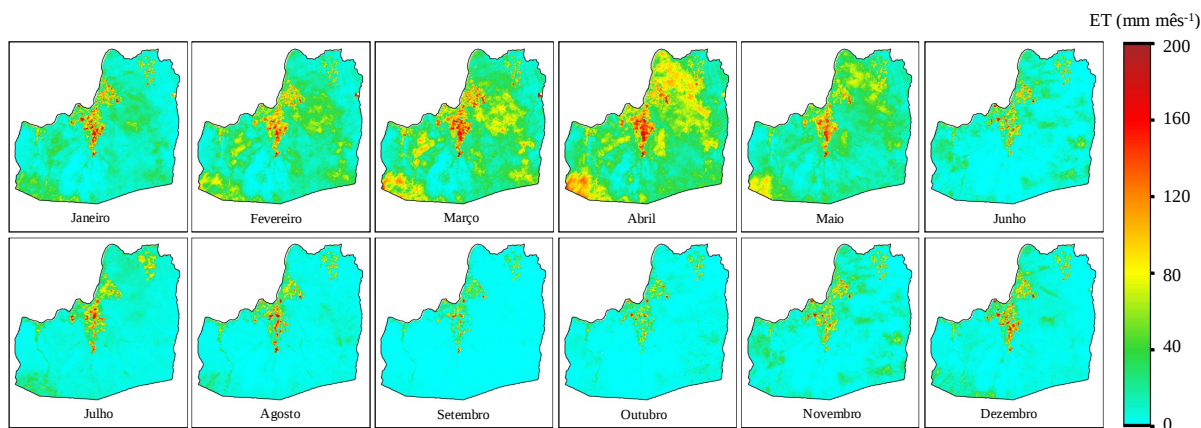


Figura 4 – Variação espacial dos valores mensais da evapotranspiração (ET) para os ecossistemas mistos durante o ano de 2011, no município de Juazeiro, Estado da Bahia, Brasil.

Os máximos valores de ET são verificados em abril, com média de 45 mm mês^{-1} . Entretanto os pixels com mais elevados valores, acima de 200 mm mês^{-1} ocorrem em agosto, novembro e dezembro. Valores intermediários da ET na vegetação natural ocorrem logo após a estação chuvosa. Como a maior parte da energia disponível na vegetação natural é usada para o fluxo de calor sensível durante o período mais seco do ano de agosto a outubro, as espécies deste ecossistema apresentam as menores taxas de ET, enquanto que as áreas irrigadas mostram as mais elevadas. Para todo o ano, o valor médio da ET foi de $234 \pm 216 \text{ mm ano}^{-1}$, representando 72% de P. Os mais elevados valores anuais dos pixels, acima de 1200 mm ano^{-1} representam culturas irrigadas, enquanto que aqueles abaixo de 300 mm ano^{-1} representam as condições não irrigadas. Estas taxas anuais estão de acordo com as condições médias reportadas por Teixeira (2009) com utilização de imagens Landsat no semiárido brasileiro.

A Figura 5 apresenta a distribuição espacial dos valores mensais da PA para o ano de 2011 no município de Juazeiro, Estado da Bahia (BA), Brasil.

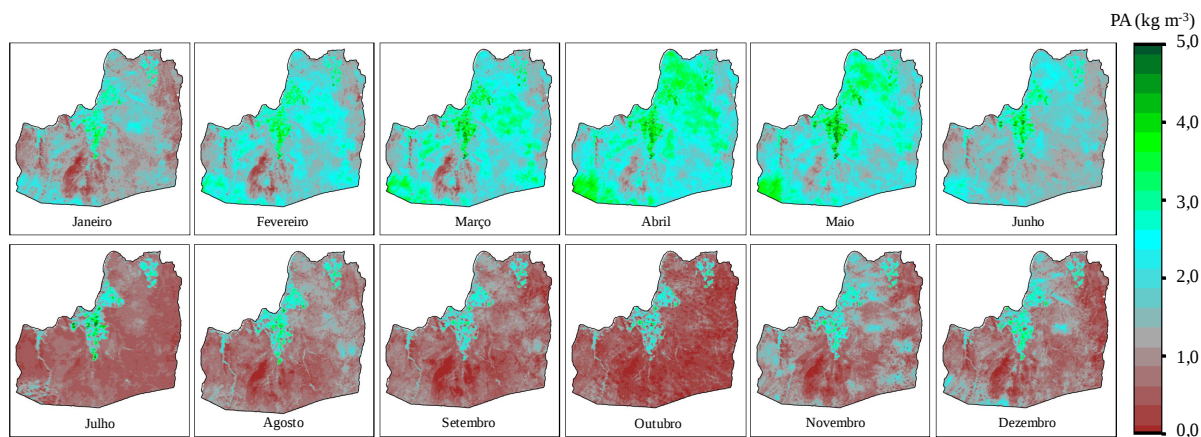


Figura 5 – Variação espacial dos valores mensais da produtividade da água (PA) para os ecossistemas mistos durante o ano de 2011, no município de Juazeiro, Estado da Bahia, Brasil.

O máximo valor médio mensal de PA ocorre em abril, de $2,4 \text{ kg m}^{-3}$, como um resultado de uma grande BIO em larga escala, enquanto que a média inferior é para outubro, ocasião onde o valor médio é de $0,8 \text{ kg m}^{-3}$. Entretanto os valores máximos dos pixels são para julho, quando as áreas bem irrigadas apresentam PA acima de $4,0 \text{ kg m}^{-3}$. Considerando-se todo o ano, o valor médio da PA foi de $1,5 \pm 0,5 \text{ kg m}^{-3}$.

A Tabela 1 apresenta os valores médios e os desvios padrões dos parâmetros biofísicos na escala mensal para culturas irrigadas e vegetação natural no município de Juazeiro, Estado da Bahia, Brasil.

Tabela 1 – Médias mensais e desvios padrões dos parâmetros biofísicos para o ano de 2011, no município de Juazeiro-BA, Brasil: produção de biomassa (BIO), evapotranspiração (ET); e produtividade da água (PA).

Meses/Ano	BIO (t ha^{-1})		ET (mm)		PA (kg m^{-3})	
	CI	VN	CI	VN	CI	VN
Janeiro	$1,98 \pm 1,47$	$0,40 \pm 0,55$	$68,7 \pm 38,1$	$16,6 \pm 16,7$	$2,37 \pm 0,63$	$1,31 \pm 0,46$
Fevereiro	$2,19 \pm 1,44$	$0,64 \pm 0,70$	$69,2 \pm 33,2$	$24,4 \pm 20,0$	$1,91 \pm 0,63$	$1,85 \pm 0,58$
Março	$2,43 \pm 1,58$	$0,83 \pm 0,82$	$82,1 \pm 38,9$	$34,0 \pm 25,6$	$2,94 \pm 0,76$	$2,06 \pm 0,67$
Abril	$2,94 \pm 1,73$	$1,17 \pm 1,03$	$86,6 \pm 35,5$	$41,7 \pm 26,2$	$3,11 \pm 0,67$	$2,36 \pm 0,65$
Mai	$2,38 \pm 1,72$	$0,70 \pm 0,76$	$67,1 \pm 33,8$	$25,6 \pm 19,0$	$3,14 \pm 0,77$	$2,18 \pm 0,61$
Junho	$2,01 \pm 1,48$	$0,35 \pm 0,41$	$60,9 \pm 31,0$	$14,5 \pm 11,3$	$2,87 \pm 0,70$	$1,64 \pm 0,41$
Julho	$0,98 \pm 0,84$	$0,05 \pm 0,11$	$63,6 \pm 35,9$	$8,9 \pm 8,9$	$2,29 \pm 0,92$	$0,69 \pm 0,29$
Agosto	$1,67 \pm 1,70$	$0,07 \pm 0,24$	$58,5 \pm 41,4$	$5,7 \pm 8,4$	$2,25 \pm 0,75$	$0,89 \pm 0,36$
Setembro	$0,99 \pm 1,21$	$0,02 \pm 0,11$	$36,8 \pm 32,8$	$1,7 \pm 4,3$	$1,95 \pm 0,70$	$0,74 \pm 0,35$
Outubro	$0,96 \pm 1,17$	$0,06 \pm 0,18$	$38,6 \pm 33,3$	$4,1 \pm 7,0$	$1,80 \pm 0,75$	$0,49 \pm 0,34$
Novembro	$1,33 \pm 1,28$	$0,16 \pm 0,36$	$52,0 \pm 35,7$	$9,1 \pm 12,9$	$1,99 \pm 0,67$	$0,97 \pm 0,45$
Dezembro	$1,44 \pm 1,37$	$0,16 \pm 0,41$	$54,4 \pm 38,1$	$7,7 \pm 13,4$	$2,08 \pm 0,69$	$0,90 \pm 0,45$
Ano	$21,30 \pm 13,37$	$4,61 \pm 4,67$	$738,5 \pm 328,0$	$194,0 \pm 140,7$	$2,39 \pm 0,55$	$1,34 \pm 0,39$

*CI – Culturas irrigadas; VN - Vegetação Natural.

Considerando os ecossistemas mistos, o período de fevereiro a maio se destaca com os maiores valores da BIO devido a boas condições de umidade armazenada no solo e elevados níveis de R_G . Entretanto, os maiores valores da ET são para o período de janeiro a abril, estando mais fortemente relacionado com P. Como elevados níveis da BIO aliados aos mais baixos da ET favorecem PA, a interseção destas condições proporciona valores de PA mais altos no período de março a junho.

De acordo com os valores de DP, as maiores variações de todos os parâmetros biofísicos descritos na Tabela 1 ocorreram no período semestre do ano, independentemente do tipo de ecossistema, se natural ou irrigado. Na escala anual, os valores da BIO, ET e PA das espécies da Caatinga representaram 22%, 26% e 56% daqueles correspondentes para as culturas irrigadas, evidenciando que mesmo com as condições de irregularidade pluviométrica do semiárido brasileiro, as espécies naturais apresentam boa eficiência de uso das chuvas, esta representada aqui pela elevada proporção de PA entre estas espécies e as culturas irrigadas.

CONCLUSÕES

O uso conjunto de imagens MODIS e dados de estações agrometeorológicas permitiram, através de modelagem, as análises dos parâmetros de produtividade da água em larga escala ao longo do ano de 2011 na mistura de ecossistemas do município de Juazeiro, Estado da Bahia,

Brasil. Estas ferramentas podem subsidiar um melhor entendimento da dinâmica dos parâmetros biofísicos, importante para dimensionamento dos impactos causados pelas mudanças de uso da terra nos balanços de energia e de água. Pôde-se concluir que, tendo o ano de 2011 como referência, o período com maiores valores de produtividade da água é de março a maio, dentro da estação chuvosa, tanto para culturas irrigadas e vegetação natural, entretanto os valores máximos ocorrem em julho.

Foi demonstrado que as variáveis de produtividade da água podem ser analisadas a partir de medições instantâneas das radiações visíveis e termal com uso de apenas quatro bandas do sensor MODIS, modelando-se da razão da evapotranspiração atual para a de referência no momento da passagem do satélite, uma vez tendo disponibilidade de dados climáticos diários. A combinação destas imagens com estações agrometeorológicas desponta como fortemente viável para o monitoramento dos parâmetros biofísicos, contribuindo para a sustentabilidade da exploração racional dos agros-ecossistemas no futuro.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo suporte financeiro ao projeto de processo 472973/2011-8.

REFERÊNCIAS

- AHAMED, T.; TIAN, L.; ZHANG, Y.; TING, K. C. (2011). A review of remote sensing methods for biomass feedstock production. *Biomass Energy* 35, pp. 2455 – 2469.
- BACCINE, A.; FRIEDL, M. A.; WOODCROCK, C. E.; WARBINGTON. R. (2004). Forest biomass estimation over regional scales using multisource data. *Geophysical Research Letters* 31, pp. 1– 4.
- BASTIAANSEN, W.G.M.; ALI, S. (2003). A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 94, pp. 321 – 340.
- LU, D. (2005). Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon basin. *International Journal of Remote Sensing* 26, pp. 2509 – 2525.
- MONTEITH, J. L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology* 9, pp. 747 – 766.
- SHI, X.; ELMORE, A.; LI, X.; GORENCE, N.J.; JIN, H.; ZHANG, X. (2008). Using Spatial Information Technologies to Select Sites for Biomass Power Plants: A Case Study in Guangdong, China. *Biomass and Bioenergy* 32, pp. 35 – 43.
- 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., Bassoi, L.H. (2009). Crop Water Productivity in Semi-arid Regions: From Field to Large Scales. *Annals of Arid Zones* 48, pp. 1– 13.
- TEIXEIRA, A.H. de C. (2012a). Modelling evapotranspiration by remote sensing parameters and agro-meteorological stations. In *Remote Sensing and Hydrology*. Org. por Neale, C.M.U. e Cosh, M.H. IAHS, ed. IAHS Press 352, pp. 154 – 157.
- TEIXEIRA, A.H. de C. (2012b). Determination of surface resistance to evapotranspiration by remote sensing parameters in the semi-arid region of Brazil for land-use change analyses. In *Remote Sensing and Hydrology*. Org. por Neale, C.M.U. e Cosh, M.H. IAHS, ed. IAHS Press 352, pp.167 – 170.