



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

GEOTECNOLOGIAS PARA CARACTERIZAÇÃO BIOFÍSICA DA REGIÃO DO CIRCUITO DAS FRUTAS DE SÃO PAULO

Antônio Heriberto de Castro Teixeira^(a), Carlos Fernando Quartaroli^(b), Janice Freitas Leivas^(b), Ivan André Alvarez^(b), Celina Maki Takemura^(c), Edlene Aparecida Monteiro Garçon^(b)

^(a) Universidade Federal de Sergipe/PRORH, heribert@globomail.com

^(b) Embrapa Territorial, [carlos.quartaroli, janice.leivas, ivan.alvarez, edilene.garcon]@embrapa.br

^(c) Embrapa Informática, celina.takemura@embrapa.br

Eixo: Geotecnologias e modelagem aplicada aos estudos ambientais

Resumo/

Nas condições de expansão de fruteiras no Circuito das Frutas do estado de São Paulo, as geotecnologias são ferramentas com grande potencial para avaliação dos componentes biofísicos em larga escala. Para quantificação e caracterização destes componentes, imagens MODIS foram usadas em conjunto com estações climáticas. Os maiores valores da produtividade da água (PA), acima de $4,0 \text{ kg m}^{-3}$ são verificados em abril, período em que a produção de biomassa (BIO) é elevada, mas a evapotranspiração (ET) é baixa. Por outro lado, os menores (inferiores a $2,0 \text{ kg m}^{-3}$) ocorrem de agosto a outubro, quando a BIO é baixa e a ET é alta. O município de Morungaba se destaca com maiores valores de PA, enquanto que os mais baixos ocorrem em Valinhos e Indaiatuba. Embora os municípios apresentem valores de precipitação (P) acima de ET em geral, em alguns períodos do ano a irrigação suplementar pode trazer benefícios.

Palavras chave: evapotranspiração, balanço hídrico, produção de biomassa, produtividade da água, fruteiras

1. Introdução

A região do Circuito das Frutas no estado de São Paulo, Sudeste do Brasil, envolve municípios com crescente atividade frutícola devido às condições ambientais favoráveis. Nestas condições de mudanças de uso da terra, o uso de geotecnologias é muito relevante para quantificação de indicadores biofísicos em larga escala, o que tem sido feito com sucesso em



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

diferentes agros-ecossistemas do Estado (TEIXEIRA et al., 2016; 2017, 2018; FRANCO et al., 2016; NUÑEZ et al., 2017, SILVA et al., 2018).

Apesar do grande potencial para fruticultura na região do Circuito, não existe um conhecimento em larga escala dos parâmetros hídricos e de vegetação que subsidiem o manejo racional das culturas bem como para gerar critérios de expansão comercial. A combinação de sensoriamento remoto com dados climáticos é uma alternativa viável para determinação das estruturas espaciais e temporais de indicadores biofísicos (BHATTARAI et al, 2017). Para propósitos operacionais, o uso da equação de Penman-Monteith (PM) tem sido sugerido na aplicação destes indicadores em diferentes escalas temporais e espaciais (VANINO et al., 2018).

O algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) (TEIXEIRA, 2010) foi usado em conjunto com o modelo da eficiência da radiação - RUE MONTEITH, 1972), permite a quantificação dos componentes da produtividade da água. Um melhor conhecimento destes componentes nos diferentes agros-ecossistemas prover informações valiosas para as práticas de conservação dos recursos hídricos sem a perda da produção agrícola. Para atingir este objetivo, faz-se as quantificações da evapotranspiração atual (ET) e da produção de biomassa (BIO) (TEIXEIRA et al., 2016, 2017).

O trabalho corrente visou a associação de imagens do satélite MODIS e dados climáticos em uma série histórica de 15 anos para caracterização biofísica da região deste Circuito para quantificação da evapotranspiração, produção de biomassa, produtividade da água e indicadores de umidade na zona das raízes dos agros-ecossistemas. Os resultados podem subsidiar a geração de critérios para a expansão comercial com sucesso das fruteiras exploradas na região.

2. Materiais e Métodos



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

A Figura 1 apresenta a localização do Circuito das Frutas no Estado de São Paulo, Sudeste do Brasil, as divisões municipais, estações climáticas utilizadas e a variação espacial da altitude.

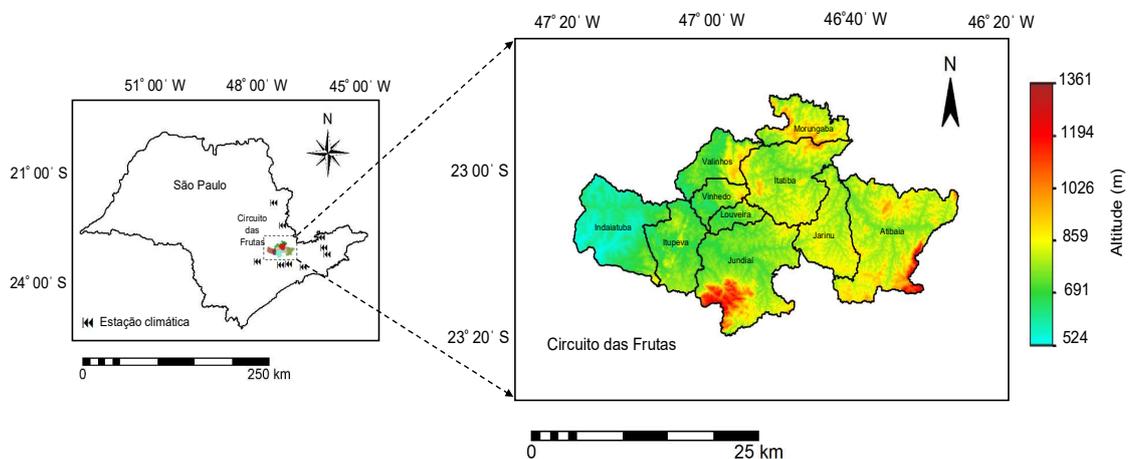


Figura 1 – Localização do Circuito das Frutas no estado de São Paulo, Sudeste do Brasil, as divisões municipais, estações climáticas e a variação espacial da altitude

De acordo com Bardin-Camparotto et al. (2013), as temperaturas médias do ar diárias do Circuito das Frutas variam entre 23,1 °C e 26,0 °C nas regiões mais altas até valores superiores a 29,1 °C na região oeste. Os meses mais úmidos são janeiro e dezembro, com totais médios mensais de precipitação superiores a 180 mm, enquanto que os meses mais secos são julho e agosto, com totais mensais inferiores a 50 mm.

Na aplicação do SAFER e do RUE, o produto reflectância do satélite MODIS MOD13Q1 foi usado com aplicação do método residual para obtenção da temperatura da superfície (T_0). As equações estão descritas em detalhes em Teixeira et al. (2016, 2017, 2018), sendo aqui apresentada apenas as equações principais

Os valores diários da razão $ET_r = ET/ET_0$ foram modelados:

$$ET_r = \exp \left[a_{sf} + b_{sf} \left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \quad (1)$$



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

onde T_0 é a temperatura da superfície, α_0 o albedo da superfície, NDVI o Índice da Diferença de Vegetação Normalizado, e a_{sf} e b_{sf} são os coeficientes de regressão.

A ET_r além de ser um indicador de umidade do solo, é usado na obtenção da ET, quando multiplicado pelas grades diárias de ET_0 obtidas das estações climáticas:

$$ET = ET_r ET_0 \quad (2)$$

A BIO foi quantificada como:

$$BIO = \sum (\varepsilon_{\max} ET_r ARAF 0,864) \quad (3)$$

onde ε_{\max} é eficiência máxima de uso da radiação, ARAF a radiação fotossinteticamente ativa absorvida, e 0,864 um fator de conversão.

A produtividade da água (PA) foi considerada em termos da ET:

$$PA = \frac{BIO}{ET} \quad (4)$$

Com dados de P e ET, indicadores de balanço hídrico foram analisados:

$$BH_r = \frac{P}{ET} \quad (5)$$

$$BH_d = P - ET \quad (6)$$

3. Resultados e discussões

A Figura 2 apresenta os valores climatológicos (2002-2016) para precipitação pluvial (P), evapotranspiração de referência (ET_0) e temperatura média do ar (T_a). (a) na escala quinzenal para toda a área do Circuito das Frutas; (b) na escala anual para cada município envolvido pelo Circuito.



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

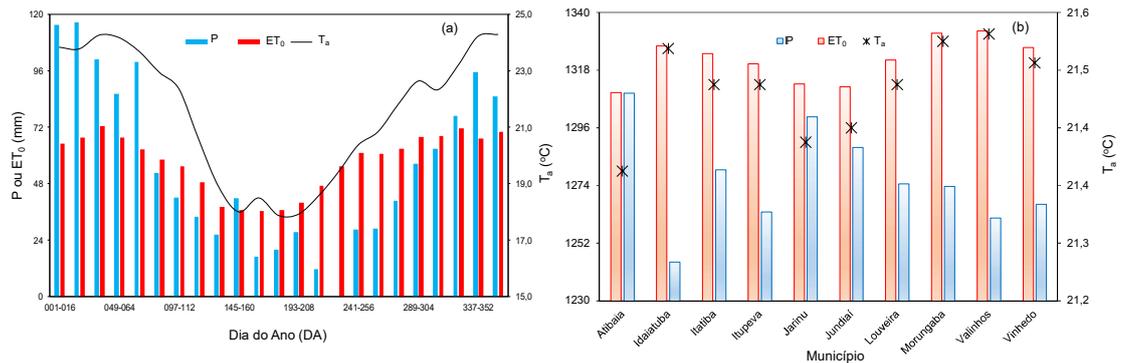


Figura 2 – Condições climáticas médias para o período de 2002 a 2016. Precipitação pluvial (P), evapotranspiração de referência (ET₀) e temperatura média do ar (T_a): (a) na escala quinzenal para todo o Circuito; (b) na escala anual para cada município envolvido pelo Circuito.

Considerando toda a região do Circuito das Frutas (Figura 2a), o período de maiores valores de P são no início e no final do ano, com destaques para os dias do ano 001 a 049, quando ficam acima de 100 mm de janeiro a fevereiro, o que está de acordo com Bardin-Camparotto et al. (2013). As menores precipitações ocorrem entre os dias do ano 161-241, de junho a agosto, com alguns eventos de estiagem.

Os valores quinzenais de ET₀ acompanham aqueles das precipitações, entretanto com P maior que ET₀ no início e no final do ano, em mais de 70%. A tendência de T_a segue aquela da ET₀, acompanhando o movimento aparente do Sol com condições térmicas mais elevadas (T_a > 24°C) nos momentos de posição zenital na região e mais frias (T_a < 18°C) no meio do ano, quando ocorre o Solstício de inverno no Hemisfério Sul.

Comparando-se os municípios de acordo com os valores climáticos anuais médios (Figura 2b), o mais e menos chuvosos são respectivamente Atibaia e Indaiatuba. Considerando as condições de demanda atmosfera as variações dos valores de ET₀ e T_a entre os municípios foram menores, em relação a P. Tomando-se a relação das chuvas e a demanda atmosférica entre os municípios, a fração de P para a ET₀ variou de 95 a 100%, o que mostra a boa disponibilidade hídrica.



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

A Figura 3 mostra a distribuição espacial, médias e desvios padrões dos valores na escala temporal trimestral, da evapotranspiração (ET), para a área do Circuito das Frutas no estado de São Paulo, Sudeste do Brasil, no período de 2002 a 2016.

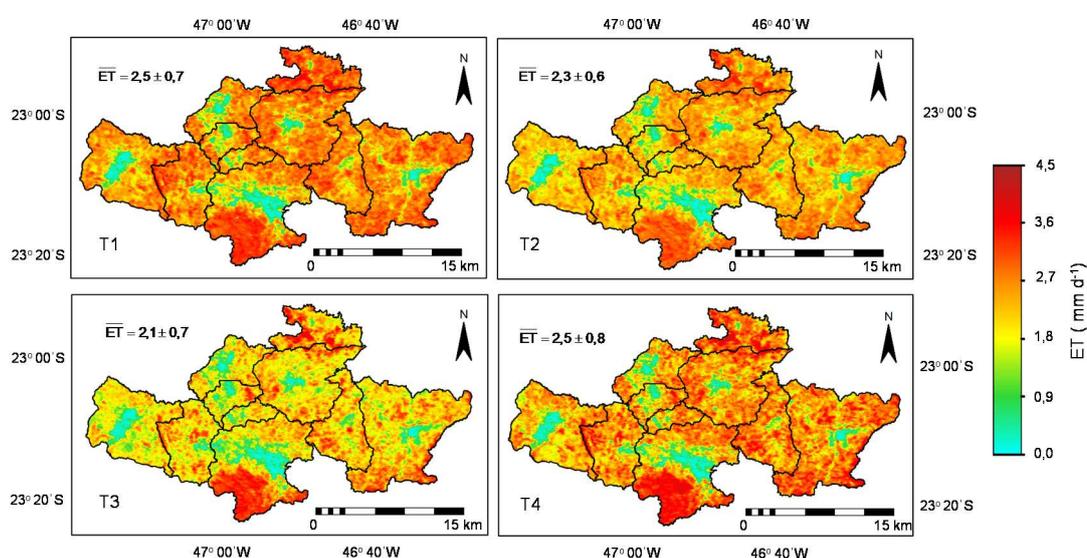


Figura 3 – Distribuição espacial, médias e desvios padrões na escala temporal trimestral da evapotranspiração (ET), para o período de 2002 a 2016.

As variações espaciais e temporais da ET são evidentes, confirmando a sensibilidade do SAFER usando apenas as bandas 1 e 2 do MODIS em conjunto com grades de dados climáticos na região do Circuito das Frutas. Estas variações são percebidas, principalmente quando se compara os trimestres de condições mais úmidas (primeiro – T1 e quarto – T4) com aquele com quantidade de chuvas e demanda atmosférica inferiores (terceiro – T3).

No Noroeste de São Paulo, Teixeira et al. (2016), usando o SAFER, encontraram valores da ET na cana-de-açúcar, variando de 0,6 a 4,0 mm d⁻¹, durante as quatro fases generalizadas da cultura, dentro das faixas de valores espaciais apresentados na Figura 3.

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial, médias e desvios padrões na escala temporal trimestral da produção de biomassa (BIO), para a área do Circuito das Frutas no estado de São Paulo, Sudeste do Brasil, no período de 2002 a 2016.



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

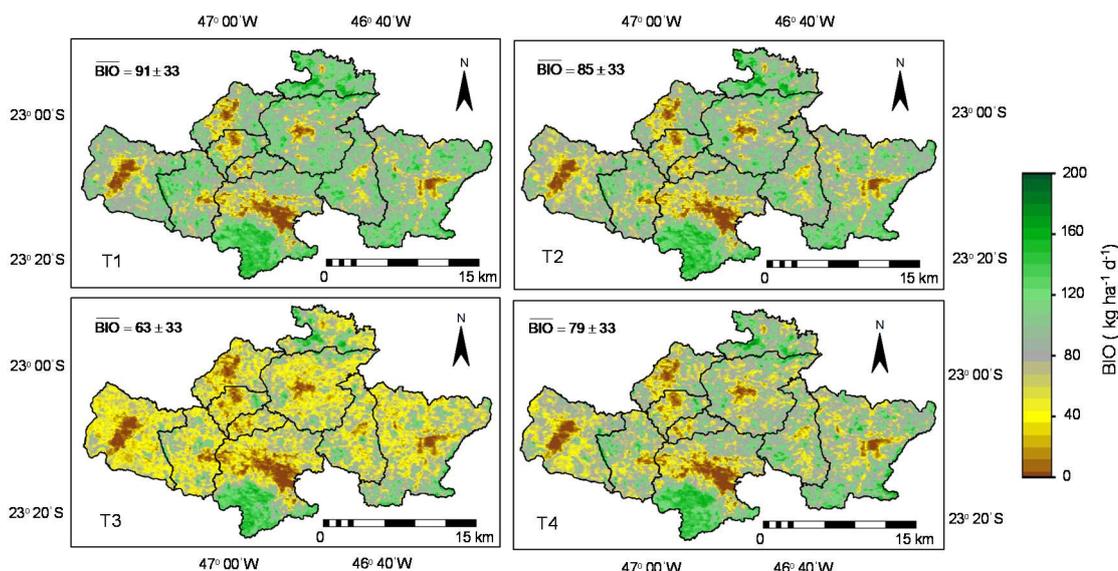


Figura 4 – Distribuição espacial, médias e desvios padrões na escala temporal trimestral da produção de biomassa (BIO), para o período de 2002 a 2016.

As variações espaciais e temporais da BIO são também evidentes, confirmando o potencial do uso conjunto do algoritmo SAFER com o modelo RUE de Monteith na região do Circuito das Frutas, claramente quando se compara os trimestres T1 e T2 com o mais seco (T3), onde respectivamente percebem-se os pixels de maiores e menores valores da BIO para as superfícies vegetadas da região. Destacam-se também os valores mais elevados da BIO no período chuvoso, quando as chuvas promovem o desenvolvimento dos dosséis das plantas a valores máximos de 200 kg ha⁻¹ d⁻¹.

No nordeste do estado de São Paulo, Teixeira et al. (2016), reportaram para a cultura da cana-de-açúcar, valores da BIO na faixa de 20 a 200 kg ha⁻¹d⁻¹, durante as quatro fases generalizadas da cultura da cana-de-açúcar, corroborando com os máximos dos pixels apresentados na Figura 4, para superfícies vegetadas.



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

A Figura 5 mostra a distribuição espacial, médias e desvios padrões na escala temporal trimestral da produtividade da água baseada na evapotranspiração (PA), para a região do Circuito das Frutas no estado de São Paulo, Sudeste do Brasil, no período de 2002 a 2016.

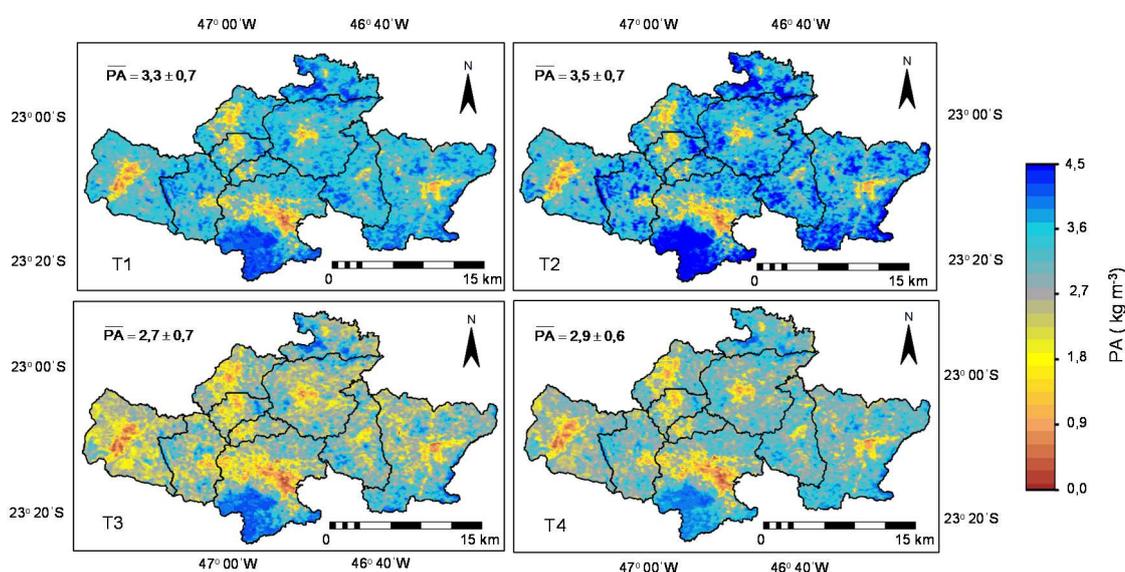


Figura 5 – Distribuição espacial, médias e desvios padrões na escala temporal trimestral da produtividade da água (PA), para o período de 2002 a 2016.

Apesar que no primeiro trimestre (T1) sejam verificados maiores valores da BIO que no segundo (T2), as menores taxas da ET em T2 promovem maiores valores de PA. Por outro lado, mesmo que no terceiro trimestre (T3) ocorram as menores taxas da ET, estas não contribuíram para a elevação da PA, devido a uma redução da BIO, com este último parâmetro apresentando os menores valores neste trimestre.

Franco et al. (2016), aplicaram o SAFER em imagens Landsat 8 para obtenção da dinâmica da PA nos anos de 2013 a 2014 no noroeste de São Paulo, encontrando uma média de $4,9 \text{ kg m}^{-3}$. A razão dos valores superiores no noroeste de São Paulo, é que estes foram obtidos em pixels específicos para os agros-ecossistemas na região. Entretanto, Nuñez et al. (2017), avaliando a PA na bacia hidrográfica do Córrego Cabeceira Comprida também no noroeste de



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

São Paulo com imagens do Landsat-8, obtiveram valores médios da PA de $3,5 \text{ kg m}^{-3}$, coincidindo com os valores representantes de boas condições hídricas na Figura 5.

Separando-se os municípios que compõem o Circuito das Frutas do estado de São Paulo, Sudeste do Brasil, a Tabela 1 apresenta os valores médios anuais dos indicadores biofísicos para o período de 2002 a 2016.

Tabela 1. Valores médios anuais dos indicadores biofísicos na escala municipal no período de 2002 a 2016 na região do Circuito das Frutas, estado de São Paulo, Sudeste do Brasil.

Indicador/ Município	ET (mm d^{-1})	BIO ($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	PA (kg m^{-3})	ET _r (-)	BH _r (-)	BH _d (mm ano^{-1})
Atibaia	$2,4 \pm 0,6$	84 ± 28	$3,2 \pm 0,6$	0,68	1,47	419
Idaiatuba	$2,1 \pm 0,6$	65 ± 26	$2,8 \pm 0,6$	0,57	1,65	489
Itatiba	$2,4 \pm 0,5$	80 ± 26	$3,1 \pm 0,5$	0,77	1,47	408
Itupeva	$2,4 \pm 0,5$	79 ± 27	$3,1 \pm 0,5$	0,76	1,46	399
Jarinu	$2,4 \pm 0,5$	83 ± 24	$3,2 \pm 0,4$	0,79	1,46	410
Jundiaí	$2,3 \pm 0,9$	81 ± 44	$3,1 \pm 1,0$	0,74	1,54	453
Louveira	$2,2 \pm 0,6$	69 ± 26	$2,9 \pm 0,6$	0,70	1,62	486
Morungaba	$2,8 \pm 0,5$	100 ± 27	$3,4 \pm 0,5$	0,88	1,26	263
Valinhos	$2,1 \pm 0,7$	66 ± 29	$2,9 \pm 0,6$	0,67	1,66	502
Vinhedo	$2,0 \pm 0,7$	64 ± 32	$2,8 \pm 0,7$	0,66	1,72	530

Com relação aos componentes da produtividade da água, o município de maiores valores da ET, BIO e PA é Morungaba, enquanto que as menores taxas são para Valinhos. Percebe-se que o município de Morungaba apresenta valores mais elevados de ET_r, evidenciando maior aproveitamento da água das chuvas, enquanto que os mais baixos ocorrem em Valinhos e Indaiatuba.

Considerando-se os indicadores de balanço hídrico, nota-se que apesar de Morungaba apresentar os maiores valores de ET_r, aqueles para ambos BH_r e BH_d são os menores, com P atendendo cerca apenas 30% da ET e excesso hídrico de 263 mm ano^{-1} , enquanto que Vinhedo e Valinhos BH_r e BH_d são maiores, com P sendo cerca de 70% superior da ET e excesso hídrico



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

acima de 500 mm ano^{-1} . Este resultado evidencia indiretamente que os ecossistemas de Morungaba têm elevada capacidade de armazenamento da água na camada de solo onde ocorrem maior concentração das raízes das plantas.

Pela Tabela 1 nota-se que embora todos os municípios do Circuito das Frutas sejam bem abastecidos de chuvas, com P acima de ET em geral, proporcionando excessos hídricos climáticos, aqueles de melhores opções para expansão da fronteira frutícola são Morungaba, Atibaia, Jarinu, Jundiá, Itatiba e Itupeva, apresentando ET_r acima de 0,60, e BIO e PA com valores respectivos maiores que $75 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ e $3,0 \text{ kg m}^{-3}$. Entretanto em alguns períodos do ano, com eventos de estiagem, a irrigação suplementar pode trazer benefícios, desde que haja boa disponibilidade hídrica para atendimento aos requerimentos hídricos das fruteiras de acordo com as fases fenológicas.

4. Considerações finais

Para quantificação e caracterização de parâmetros biofísicos na região do Circuito das Frutas, situado no estado de São Paulo, Sudeste do Brasil, os algoritmos SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) e RUE (*Radiation Use Efficiency*) foram aplicados com sucesso em conjunto com parâmetros obtidos com imagens MODIS e dados climáticos em uma série histórica de dados de 2002 a 2016.

Os maiores valores da produtividade da água (PA) são verificados no segundo trimestre do ano, enquanto que os menores ocorrem no terceiro, com as variações espaciais indicando diferentes condições de umidade na zona das raízes das espécies naturais e heterogeneidade nas fases fenológicas nas culturas agrícolas ao longo do ano.

Embora todos os municípios do Circuito das Frutas sejam bem abastecidos de chuvas, com a precipitação pluvial (P) acima de evapotranspiração (ET) em geral, proporcionando excessos hídricos, em alguns períodos do ano com eventos de estiagem a irrigação suplementar pode trazer benefícios, desde que haja disponibilidade hídrica para a prática, com o município de Morungaba se destacando com condições de maior aproveitamento da água das chuvas.



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

5. Referências Bibliográficas

BARDIN-CAMPAROTTO, L.; PEDRO JUNIOR, M. J.; BLAIN, G.C.; MORAES, J.F.L. de; HERNANDEZ, J.L. **Polo turístico do Circuito das Frutas do estado de São Paulo: Fisiografia e clima**. Boletim técnico. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas-IAC, 2013.

BHATTARAI, N.; WAGLE, P.; GOWDA, P.H.; KAKANI, V.G. Utility of remote sensing-based surface energy balance models to track water stress in rain-fed switchgrass under dry and wet conditions. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 113, p. 128-141, 2017.

FRANCO, R.A.M.; Hernandez, F.B.T.; Teixeira, A.H. de C.; LEIVAS, J.F.; NUNEZ, D.N.C.; Neale, C.M.U. Water productivity mapping using Landsat 8 satellite together with weather stations. In: SPIE Remote Sensing 2016, 2016, Edinburgh. **Proceedings of SPIE**. Edinburgh: SPIE Digital Library, v. 9998. p. 99981H-1-99981H-12, 2016.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v. 9, p. 747-766, 1972.

NUÑEZ, D.C.; HERNANDEZ, F.B.T.; TEIXEIRA, A.H. de C.; FRANCO, R.A.M.; LEIVAS, J.F.L. Water productivity using SAFER - Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving in watershed. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, p.524 - 529, 2017.

SILVA, C.O.F.; MANZIONE, R.L.; TEIXEIRA, A.H. de C. Modelagem espacial da evapotranspiração e produtividade hídrica na porção paulista do afloramento do aquífero Guarani entre 2013 e 2015. **Holos Environment**, v.18, p. 126-140, 2018.



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

TEIXEIRA, A.H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing an Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; RONQUIM, C. C.; VICTORIA, D. de C. Sugarcane water productivity assessments in the São Paulo state, Brazil. **International Journal of Remote Sensing Applications**, v.6, p.84 - 95, 2016.

TEIXEIRA, A.H. de C.; LEIVAS, J.F.; RONQUIM, C.C.; GARCON, E.A. M.; SILVA, G.B. Water and vegetation indices by using MODIS products for eucalyptus, pasture and natural ecosystems in the eastern São Paulo state, Southeast Brazil. **Proceedings of SPIE**, v.10421, p.1042112-1 - 1042112-12, 2017.

TEIXEIRA, A.H. de C.; LEIVAS, J.F.; RONQUIM, C.C.; BAYMA-SILVA, G. The use of MODIS images to quantify the energy balance in different agroecosystems in Brazil In: Multi-purposeful application of geospatial data.1 ed. London: InTech, 2018, v.1, p. 105-121.

VANINO, A S.; NINOA, P.; MICHELEB, C.; De, BOLOGNESIB, S.F.; D'URSO, G.; BENED, C. Di; PENNELLID, B.; VUOLOE, F.; FARINAD, R.; PULIGHEA, G.; NAPOLID, R. Capability of Sentinel-2 data for estimating maximum evapotranspiration and irrigation requirements for tomato crop in Central Italy. **Remote Sensing of Environment**, v. 215, p. 452-470, 2018.