Revista Brasileira de Climatologia
ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

ESTIMAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL SOB DISTINTAS CONDIÇÕES DE REFERÊNCIAS PARA DETERMINAÇÃO DO CONSUMO HÍDRICO DA SOJA E MILHO

BERUSKI, Gustavo Castilho – prof.gustavo@faesb.edu.br
Faculdade de Ensino Superior Santa Bárbara / FAESB

DUARTE, Yuri Catalani Nepomuceno - yurynepomuceno@gmail.com
Universidade de São Paulo / USP

Submetido em: 27/01/2020
Aceito para publicação em: 19/11/2020
Publicado em: 01/12/2020
DOI: http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.71357

RESUMO: Objetivou-se com o presente trabalho estimar a evapotranspiração de referência (ETo) em Piracicaba, SP, empregando diferentes culturas de referência e escalas de tempo para determinação do consumo hídrico da soja e milho. A ETo foi calculada com o método padronizado de Penman-Monteith, no período entre 2011 e 2014. Os dados meteorológicos foram obtidos junto à estação meteorológica automática da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ-USP). A ETo foi calculada considerando uma superfície vegetada com alfafa e grama como culturas de referência, as estimativas foram comparadas na escala horária e diária. Os valores estimados de ETo foram utilizados para determinar a evapotranspiração de cultura (ETc) para o milho e a soja. Os resultados indicam que a ETo estimada sobre superfície coberta com alfafa foi superior comparada à grama. Nas diferentes escalas de tempo, os maiores valores estimados de ETo foram obtidos empregando dados meteorológicos horários, independentemente da cultura de referência. Os distintos valores estimados de ETo impactaram o consumo hídrico da soja e do milho, em que maior ETc foi observada em condição de uso da alfafa como cobertura de referência e com dados horários para sua estimativa.

PALAVRAS-CHAVE: Evapotranspiração de referência, Grama, Alfafa, Escala temporal.

ESTIMATION OF POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION UNDER DIFFERENT REFERENCE CONDITIONS FOR DETERMINING THE WATER CONSUMPTION OF SOYBEAN AND MAIZE

ABSTRACT: The objective of this study was to estimate the reference evapotranspiration (ETo) in Piracicaba, SP, using different reference cultures and time scales to determine the water consumption of soybean and corn. ETo was calculated using the standardized method of Penman-Monteith, between 2011 and 2014. The meteorological data were obtained from the automatic weather station at the Luiz de Queiroz College of Agriculture (ESALQ-USP). ETo was calculated considering a surface vegetated with alfalfa and grass as reference crops, the estimates were compared on an hourly and daily scale. Estimated ETo values were used to determine crop evapotranspiration (ETc) for corn and soybean. The results indicate that the estimated ETo on a surface covered with alfalfa was higher compared to grass. At different time scales, the highest estimated ETo values were obtained using hourly meteorological data, regardless of the reference culture. The different estimated values of ETo impacted the water consumption of soybean and corn, in which the highest ETc was observed under the condition of using alfalfa as a reference cover and with hourly data for its estimate.

KEYWORDS: Reference evapotranspiration, Grass, Alfalfa, Temporal scale.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

1. INTRODUÇÃO

A água é essencial para a vida no planeta, estando diretamente relacionada à qualidade de vida em centros urbanos, sendo indispensável para a produção agrícola (WEINDL et al., 2017). Na última década, com as dificuldades inerentes à gestão dos recursos hídricos e da ocorrência de eventos meteorológicos adversos, regiões brasileiras têm enfrentado problemas na disponibilidade de água, gerando grave crise hídrica, principalmente nas regiões nordeste (MARENGO, TORRES, ALVES, 2017) e sudeste do Brasil (NOBRE et al. 2016). Segundo a Agência Nacional das Águas (ANA, 2017), o consumo hídrico no Brasil é dividido em três frentes, que por ordem decrescente de consumo tem-se a agricultura irrigada, o abastecimento urbano e as indústrias. Juntos os setores demandam um volume de água equivalente a cerca de 1.650 $m^3\ s^{-1}$.

A agricultura é classificada como o maior consumidor de água, portanto torna-se indispensável o conhecimento e o entendimento de técnicas de manejo de áreas irrigadas (LÉLLIS et al., 2017). Portanto, a estimação da evapotranspiração de referência (ETo) e de culturas agrícolas (ETc) é imprescindível para evitar o uso excessivo da água, bem como perdas de produtividade vegetal decorrentes de episódios de falta de água e excedentes hídricos (PAREDES et al., 2018). Estudos recentes demonstraram que para a soja, o milho e a cana-de-açúcar o principal fator responsável pela obtenção de altas produtividades é a disponibilidade de água no solo para que as plantas possam produzir dentro de um ótimo de eficiência fisiológica em dada localidade climática (SENTELHAS et al., 2015; NÓIA JUNIOR; SENTELHAS, 2019; DIAS; SENTELHAS, 2019)

A irrigação objetiva o fornecimento de água para uma cultura agrícola afim de evitar perdas por déficit hídrico, contudo a implantação de um sistema de irrigação requer investimentos e investigações científicas para determinar o volume e a frequência de aplicação de água no ambiente de produção. Dentre as análises prévias à instalação de um sistema a determinação da evapotranspiração do sistema de interesse, bem como a avaliação de variáveis, constitui-se como a mais importante (OLIVEIRA; CARVALHO, 1998; SILVA et al., 2005).

A evapotranspiração é fundamental para a caracterização do balanço hídrico de um sistema agrícola. Contudo, sua medida é complexa e de difícil determinação no campo (PEREIRA et al., 1997). A complexidade deve-se as incertezas da representatividade das medidas, dificuldades operacionais e variabilidade espacial da superfície (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDYIAMA, 1997). Assim, torna-se conveniente fazer o uso de modelos de estimação da ETo, que variam em complexidade e variáveis de entrada (BACK, 2007).

Os métodos de estimação para obtenção de ETo podem ser subdivididos em cinco categorias: Balanço hídrico; Transferência de massa; Métodos combinados; Radiação e Métodos baseados na temperatura (XU; SINGH, 2001; 2002). A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2006), recomenda o uso do método proposto por Penman-Monteith para estimar a ETo (ALLEN et al., 1998). O método foi parametrizado para uma superfície gramada, com 12 cm de altura, albedo de 0,23 e uma resistência aerodinâmica de 70 $s\ m^{-1}$, e é considerado padrão para a determinação da ETo (SMITH et al., 1990). Smith (1991) consideram que o método de Penman-Monteith foi

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

consagrado por diversos pesquisadores como sendo aquele que proporciona o melhor desempenho com vistas a obtenção ETo.

Em 1999, a Sociedade dos Engenheiros Civis Americanos (ASCE, sigla em inglês) propôs padronizar e atualizar a equação horária e diária de estimativa da ETo publicada no boletim 56 da FAO (WALTER et al., 2005). Por ocasião do procedimento de padronização, considerou-se a cultura de porte baixo (similar a grama) ou possuindo porte mais alto (similar a alfafa).

Como alternativa aos coeficientes 900 no numerador e 0,34 no denominador da equação da FAO-56, propôs-se as constantes denominadas de Cn e Cd, as quais são dependentes da superfície vegetada e do intervalo de tempo empregado para estimativa da ETo. Apesar da similaridade nas equações parametrizadas para uma cultura de porte baixo, os valores de Cn consideram uma resistência do ar de 50 e 200 s m^{-1} para o período diurno e no período noturno, respectivamente. Enquanto a equação da FAO-56 considera um valor fixo de 70 s m^{-1} para um período diário. Essa padronização utilizada pela FAO-56 proporciona uma maior estimativa da ETo durante o dia e menores durante a noite (ALLEN, 1996; ALLEN et al., 2006; IRMAK et al., 2005; VENTURA et al., 1999; WALTER et al., 2005; PERERA et al., 2015).

O setor agrícola é o principal usuário da água disponível no planeta. No Brasil, cerca de 20% da irrigação destina-se para repor água em campos de produtores de grãos. Dentre esses, destacam-se as culturas da soja e do milho, as quais ocupam uma área irrigada de 624 e 559 mil ha^{-1}, respectivamente (ANA, 2017). Assim, visto a importância do uso racional dos recursos hídricos, principalmente no que tange a utilização da água na irrigação, teve-se por objetivo verificar o efeito de cultura de referência e escala temporal de medida sobre as taxas de evapotranspiração de referência e de evapotranspiração máxima das culturas de soja e milho cultivadas sob as condições climáticas de Piracicaba, SP, durante dois momentos simulados de semeadura.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no campus da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP (Figura 1). O local encontra-se nas seguintes coordenadas geográficas: latitude 22° 42' Sul, longitude 47° 38’ Oeste e altitude de 546 metros. O clima local segundo Köppen é classificado como do tipo Cfa (ALVARES et al., 2013).

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

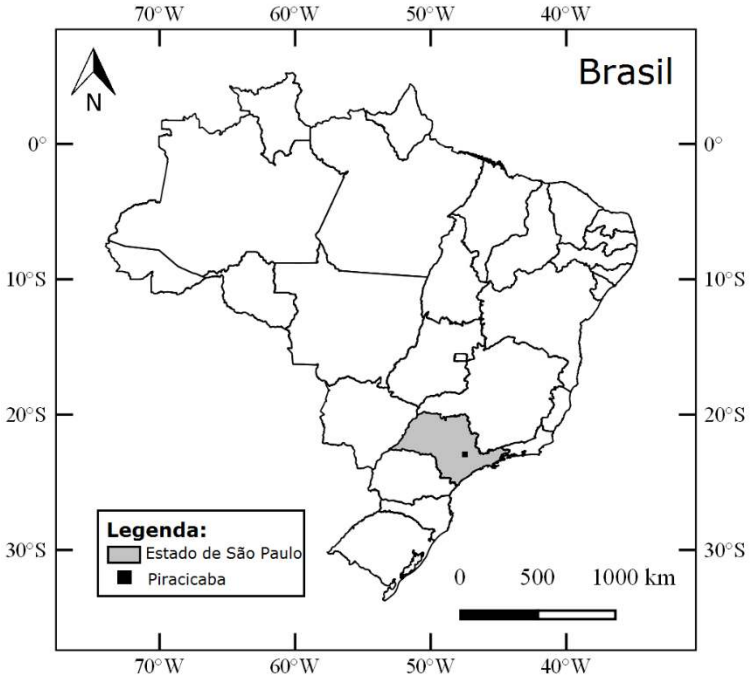


Figura 1 – Localização da área experimental.

A série de dados meteorológicos empregada compreende registros diários e de quinze em quinze minutos, realizados período compreendido entre janeiro de 2011 e dezembro de 2014. Para tais registros a estação meteorológica contou com sensores para medição de saldo de radiação (modelo NR LITE, marca Kipp & Zonen), densidade de fluxo de radiação solar global (Piranômetro CM3), radiação fotossinteticamente ativa (Sensor Quantum LI-190SB), temperatura do ar e umidade relativa do ar (HMP35C), velocidade e direção do vento (anemômetro universal, modelo 03001) e chuva (pluviômetro, modelo TR-525M). Os referidos sensores foram acoplados a um Datalogger modelo CR-1000, da marca Campbell Scientific Inc.

O método utilizado para a estimação da evapotranspiração de referência foi baseado na fórmula descrita Penman-Monteith e padronizada por Allen et al. (1998). Adotou-se a parametrização proposta pela ASCE, a qual considera valores horários e diferentes valores de resistência de superfície para o período diurno e noturno (ASCE-EWRI, 2005; PEREIRA et al., 2015):

$$\mathrm{ET_o} = \frac{0{,}408\times\Delta\times(\mathrm{Rn}-\mathrm{G}) + \gamma\left(\frac{\mathrm{Cn}}{\mathrm{T}+273}\right)\times\mathrm{U2}\times(\mathrm{es}-\mathrm{ea})}{\Delta + \gamma\times(1+\mathrm{Cd}\times\mathrm{U2})} \quad (1)$$

Sendo: ETo a evapotranspiração de referência estimada para uma superfície considerando uma cultura de referência similar a grama (ETo_g) ou a alfafa (ETo_a) (mm dia^{-1} ou mm hora^{-1}), Rn o saldo de radiação sobre a superfície (MJ m^{-2} dia^{-1} ou MJ m^{-2} hora^{-1}), G a fração do balanço de energético que representa o fluxo de calor no solo (MJ m^{-2} dia^{-1} ou MJ m^{-2} hora^{-1}), T a temperatura média do ar registrada a 2 metros de altura na escala diária ou horária (°C), U2 a

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

velocidade do vento a 2 metros de altura (m s^{-1}), es a pressão de saturação de vapor de água na atmosfera (kPa), ea a pressão atual de vapor na atmosfera (kPa), (es-ea) o déficit de saturação de vapor (kPa), Δ a tangente a curva de pressão de vapor (kPa °C^{-1}), γ o coeficiente psicrométrico para psicrômetro de ventilação natural (0,081 kPa °C^{-1}).

Para o cálculo das variáveis es, ea, Δ e To empregou-se as seguintes equações:

$$es = 0{,}611 \times 10^{\frac{(7{,}5\times T)}{(237{,}3+T)}} \quad (2)$$

$$ea = \frac{(es\times UR)}{100} \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{(es_{To} - es)}{(To - T)} \quad (4)$$

$$To = \frac{\left(237{,}3\times \log\frac{ea}{0{,}611}\right)}{\left(7{,}5 - \log\frac{ea}{0{,}611}\right)} \quad (5)$$

Sendo: T a temperatura média do ar registrada a 2 metros de altura (°C), UR a umidade relativa média registrada a 2 metros de altura (%), To a temperatura do ponto de orvalho média registrada a 2 metros de altura (°C), es_{To} a pressão de saturação de vapor de água na atmosfera calculada em função da temperatura do ponto de orvalho (kPa).

Com exceção das variáveis Cn e Cd (Tabela 1), as demais variáveis de entrada basearam-se no Boletim 56 da FAO (ALLEN et al., 1998). Considerou-se o fluxo de calor no solo (G) igual a zero, pois na escala diária o fluxo de calor descendente diurno se iguala ao fluxo de calor ascendente noturno.

Para a determinação de ETo, considerou-se as culturas de referência grama (ETo_g) e alfafa (ETo_a), representando culturas de porte baixo e alto, respectivamente. Para a cultura da grama adotou-se um índice de área foliar (IAF) médio de 0,288 e de 1,2 para a cultura da alfafa (ALLEN et al., 1998). A estimação da ETo foi realizada na escala diária, a partir da somatória dos dados horários, para a escala horária a série foi subdivida em período diurno e noturno.

Os valores dos coeficientes Cn e Cd da equação 1 foram extraídos de Pereira et al. (2015) e variam em função da escala temporal empregada e da cultura de referência utilizada para estimação de ETo. Por definição, o coeficiente Cn é dado pelo numerador constante que muda com o tempo de referência utilizado no cálculo de ETo, ao passo que Cd é o denominador constante que se modifica com o tempo de referência adotado. Dessa maneira, os coeficientes Cd e Cn referem-se à resistência aerodinâmica da cultura de referência considerada, a qual é condicionada pela escala de tempo medida (SILVA et al., 2012; RIBEIRO, 2009; LIRA, 2008). Os valores de Cn e Cd utilizados encontram-se expostos na tabela 1.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Tabela 1 - Valores de Cn e Cd empregados no cálculo de ETo (Adaptado de PEREIRA et al., 2015).

Escala de tempo para cálculo de ETo	Cultura de referência			
	Superfície gramada		Superfície com alfafa	
	Cn	Cd	Cn	Cd
Diária	900	0,34	1600	0,38
Horária – período diurno	37	0,24	66	0,25
Horária – período noturno	37	0,96	66	1,7

Os valores calculados de ETo_g e ETo_a, nas diferentes escalas de tempo, foram confrontados por meio de regressão linear simples, em que a precisão dos dados foi expressa pelo coeficiente de determinação (R^2) (LEGATES; McCABE, 1999). Entretanto, a exatidão das estimativas foi ilustrada graficamente pela dispersão dos pares ordenados ao redor da reta 1:1.

Como forma de demonstrar os possíveis impactos das estimações de ETo_g e ETo_a, nas diferentes escalas de tempo, em uma condição de campo simulou-se o desenvolvimento e o consumo hídrico de duas importantes culturas agrícolas cultivadas em áreas agricultu̇ráveis do Brasil, a soja e o milho. Os cálculos de evapotranspiração potencial das culturas (ETc) mencionadas anteriormente, foram realizados em dois períodos distintos, um deles a safra (15/10/2011 até 21/02/2012) e o segundo na safrinha (22/02/2012 até 30/06/2012).

Para o cálculo de ETc a demanda potencial atmosférica foi multiplicada pelo coeficiente de cultivo (Kc), cujos valores são descritos por Allen et al. (1998) e demonstrados na Tabela 2. As fases do desenvolvimento e respectivas durações foram baseadas em Ritchie et al. (1997) e Fancelli e Dourado Neto (2000), para soja e milho, respectivamente.

Tabela 2 – Coeficientes de cultivo (kc), descritos por Allen et al. (1998), para as culturas da soja e milho, nas diferentes fases do desenvolvimento das culturas utilizados para o cálculo de ETc.

Fases do Desenvolvimento	Coeficiente de cultivo	
	Soja	Milho
Estabelecimento	0,56	0,40
Desenvolvimento	1,21	0,80
Floração	1,50	1,20
Frutificação	1,50	0,90
Maturação	0,90	0,60

Para a mensuração de diferenças no consumo hídrico estimado das culturas de soja e milho nas épocas de safra e safrinha, a partir de ETo_g e ETo_a obtidos nas diferentes escalas temporais, empregou-se o teste t para uma única amostra (CASELLA et al., 2010). O teste t de uma amostra é um procedimento estatístico usado para determinar se uma amostra de observações poderia ter sido gerada por um processo com uma média específica (DANIEL et al., 2012). Neste caso, o objetivo do teste foi determinar se a há diferenças entre os valores estimados de ETc nas diferentes escalas de tempo com a aplicação da evapotranspiração estimada com grama e alfafa.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das análises estatísticas realizadas, foi possível identificar que o uso de diferentes culturas de referência, bem como a adoção de distintas escalas temporais de medida podem afetar as estimativas de ETo. Para as condições de Piracicaba, SP, observou-se que os valores de ETo foram maiores quando se considera a alfafa como cultura de referência em comparação à demanda potencial oriunda de superfície gramada (Figura 2). Os valores médios de ETo_g e ETo_a foram, respectivamente, 2,85 e 3,20 mm dia^{-1}, com coeficiente de determinação (R^2) correspondente a 0,9681. De acordo com a dispersão dos dados ao redor da reta 1:1, verifica-se um erro sistemático na estimativa de ETo ao se adotar diferentes culturas de referência, sendo que para todas as situações a ETo advinda de superfície cultivada com alfafa sempre suplantou aquela obtida em superfície gramada.

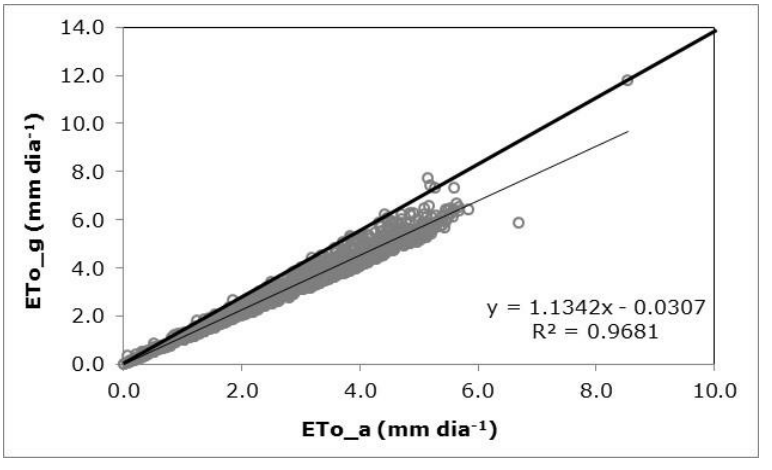


Figura 2 – Estimativa de evapotranspiração potencial (ETo) na escala diária, para superfície coberta com grama e alfafa. Piracicaba, SP.

Assim como no presente estudo, diferenças na estimação de ETo, considerando-se grama e alfafa como culturas de referência, foram observadas na Flórida, USA. Neste caso particular, Irmak et al. (2003) verificaram que os mesmos métodos, embora sob distintas coberturas de referência, resultaram em valores de ETo discrepantes, sendo que as taxas evapotranspiratórias obtidas a partir de superfície vegetada com alfafa foram sempre mais elevadas do que aquelas detectadas em superfície gramada. Esse padrão de resposta foi também evidenciado por diversos métodos de estimação, inclusive pelo recomendado pela FAO (ALLEN et al., 1994).

Como mencionado, os coeficientes Cd e Cn estão associados aos impactos que podem ser gerados no processo de evapotranspiração, devido à resistência aerodinâmica da cultura de referência utilizada e da escala de tempo medida (SILVA et al., 2012; RIBEIRO, 2009; LIRA, 2008). Portanto, impactos no valores de ETo são esperados, e ressalta-se que, devido a essa interação, impactos diretos no uso e manejo da água em sistemas agrícolas podem ser observados. Por exemplo, considerando a somatória dos valores diários para o período e condições climáticas em análise verificou-se uma diferença no consumo de água de 490,52 mm entre a grama e a alfafa.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

Embora, para as condições meteorológicas de Piracicaba, SP, a superfície gramada tenha apresentado valores mais baixos de ETo, não significa que esta seja a cultura de referência mais adequada para a localidade, para corroborar o resultado é necessário efetuar medidas da ETo em lisímetros. Evidências dessa natureza foram observadas por Evett et al. (2000), para a localidade de Bushland, Texas, USA, onde os valores estimados de ETo, pela metodologia padronizada pela FAO, em superfície coberta com alfafa apresentou valores mais próximos aos medidos por lisímetros, comparados a superfície gramada, nesta situação a ETo estimada em superfície grama sempre subestimou a ETo medida em lisímetros.

Além dos efeitos da cobertura de referência nos valores estimados de ETo, o intervalo de tempo utilizado para sua estimativa, também interferiu em seus valores para as condições de Piracicaba, no período diurno e noturno (Figura 3).

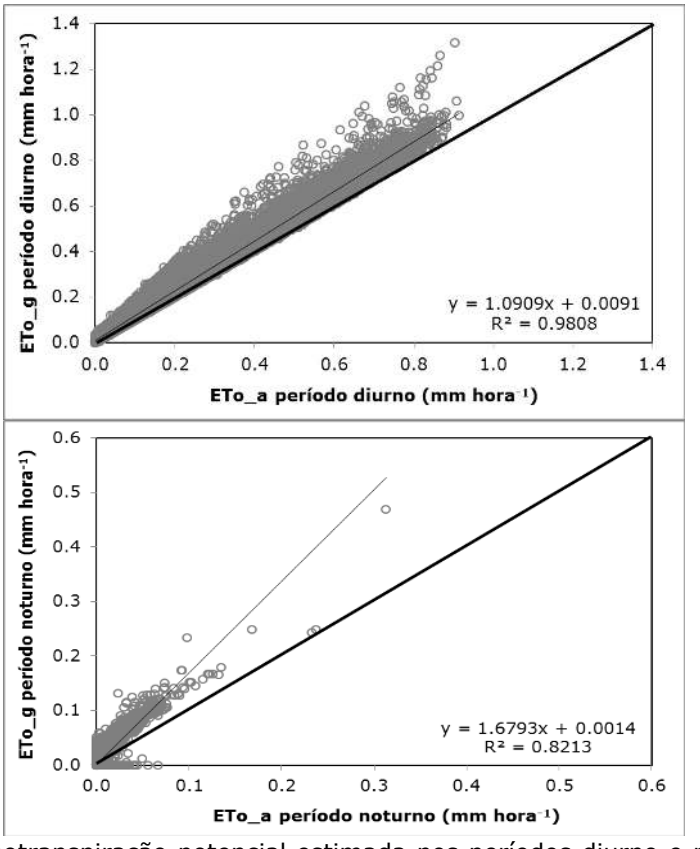


Figura 3 - Evapotranspiração potencial estimada nos períodos diurno e noturno a partir de superfície gramada (ETo_g) e cultivada com alfafa (ETo_a) no município de Piracicaba, SP.

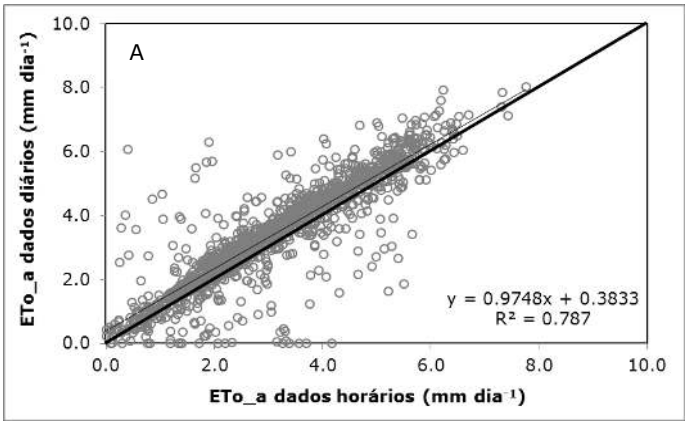
Sob análise comparativa entre as culturas de referência, novamente verificou-se que a ETo estimada em superfície coberta com alfafa foi superior a ETo obtida em superfície gramada. Para a estimativa de ETo durante o período diurno os valores estimados em superfície coberta por alfafa foram mais proeminentes, comparados a ETo pertinente ao período noturno (Figura 3). Durante o período noturno as culturas de referência muito pouco condicionaram as taxas de evapotranspiração potencial, dada a baixa demanda evaporativa da

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

atmosfera e a elevada resistência da cobertura vegetal, uma vez que balanço geral de radiação local assume valor negativo (WANG; DICKINSON, 2012). Isto se verifica na prática em plantas de metabolismo C3 e C4, quando os estômatos se encontram fechados no período de ausência de luz e quando o conteúdo hídrico vegetal é mais elevado tanto no período da noite como também no início do dia (SILVA et al., 2014).

Durante o período noturno a evapotranspiração depende de fatores como o vento e a energia acumulada no sistema para que esse processo ocorra (DIOS et al., 2015). Apesar de ser menor quando comparada à evapotranspiração diurna, não se deve desprezá-la (CAMPECHE et al., 2011). Pereira et al. (2001), em medidas lisimétricas, verificou que a evapotranspiração noturna pode representar até 15% da evapotranspiração diária. Segundo Silva (2005), a evapotranspiração noturna encontrada em lima ácida contribuiu com 17,4 e 13,4% da evapotranspiração total no período do verão e do inverno, respectivamente.

Como relatado, a estimação de ETo também sofre influência do intervalo de tempo adotado para sua quantificação. Essa condição imposta no experimento pode ser ilustrada na Figura 4, tendo em vista o procedimento de estimativa de ETo_g e ETo_a baseado na coleta de dados meteorológicos diários. Impactos da escala temporal de medida dos elementos meteorológicos empregados para estimar ETo sobre ambas culturas de referência podem afetar substancialmente o planejamento da irrigação com vistas a definição da lâmina ideal de água a ser aplicada no momento certo ao longo do ciclo das culturas sob óptica da agricultura sustentável.



ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

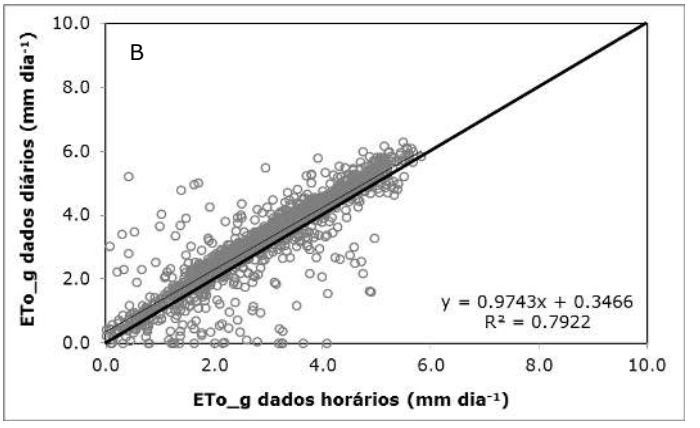


Figura 4 – Evapotranspiração de referência (ETo) estimada a partir de superfícies cobertas com grama (A) e alfafa (B) na escala diária comparada a ETo diária calculada em função da contabilização de observações meteorológicas horárias.

Segundo Back (2007) a determinação da ETo sob diferentes intervalos de tempo dependerá do objetivo da pesquisa e do nível de detalhamento das informações meteorológicas para fins específicos. Para a metodologia da FAO, padronizada por Allen et al. (1998), a equação de Penman-Monteith fornecerá maior precisão quando ETo for estimada a partir de medidas diárias, provenientes do somatório de observações meteorológicas monitoradas na escala horária (JENSEN et al., 1990).

Diferenças significativas nas estimativas de ETo em função da escala de medida dos elementos meteorológicos locais que condicionam a demanda evaporativa da atmosfera foram também detectadas por Back (2007). O referido autor conduziu um estudo para examinar o efeito da escala temporal adotada sobre as variações de ETo calculada, levando em consideração intervalos de tempo de um, cinco, dez, quinze e trinta dias, e constatou que para a escala diária de medida os coeficientes de variação flutuaram entre 30 e 40%, ao passo que na escala mensal os coeficientes de variação oscilaram entre 6 e 12%.

Os reflexos das diferentes estimativas de ETo sobre o consumo hídrico das culturas de milho e soja, considerando os períodos de safra e safrinha são demonstrados nas Figuras 5 e 6, respectivamente. Sob as condições climáticas vigentes na região estudada, verificou-se que os maiores valores estimados de ETc foram obtidos para o período de safra. O maior consumo hídrico neste período para ambas as culturas de referência se deve a maior disponibilidade de radiação solar no hemisférios sul, contribuindo de forma mais intensa para o aumento do saldo de radiação local, o qual proporcionou, consequentemente, maior energia líquida disponível para a geração do processo evapotranspiratório (LE).

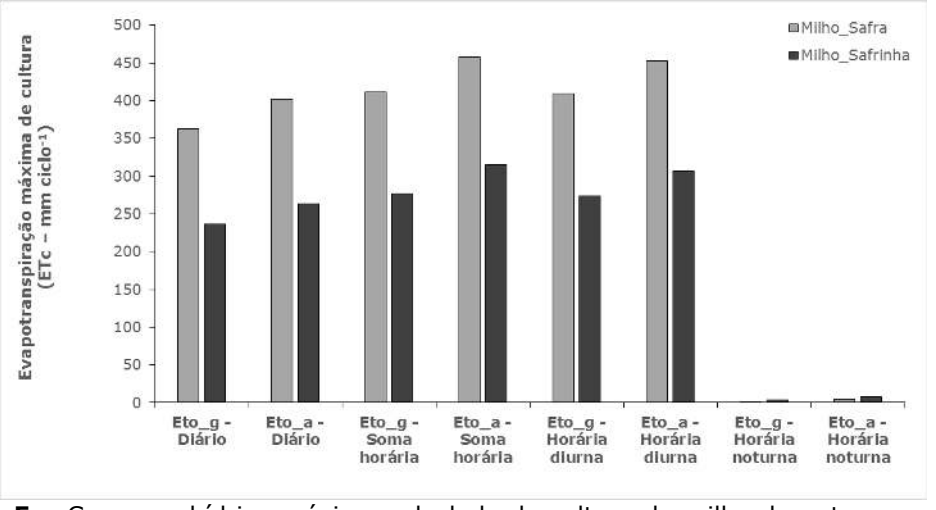


Figura 5 – Consumo hídrico máximo calculado da cultura do milho durante os períodos de safra e safrinha, utilizando-se como variável de entrada a evapotranspiração potencial (ETo) estimada sob diferentes escalas de tempo para superfícies cultivadas com grama e alfafa.

Considerando-se as culturas de soja e milho, verifica-se maior consumo hídrico da cultura da soja, o qual foi da ordem de, aproximadamente, 150 mm por ciclo de cultivo, constatando-se assim que a soja possui maior necessidade hídrica em comparação ao milho. Déficit hídricos devidos a erros no manejo da irrigação podem acarretar perdas na produção da cultura de interesse, principalmente quando a deficiência hídrica se dá durante os estádios de florescimento e enchimento de grãos. Segundo Berlato (1987), correlacionando o rendimento de grãos da soja com o consumo relativo de água da cultura, observou que cerca de 89, 86 e 85% da variação do rendimento de grãos de soja pertencentes aos grupos de maturação precoce, médio e tardio, respectivamente, foram decorrentes de condições de suprimento inadequado de água no solo durante o subperíodo crítico de desenvolvimento da cultura.

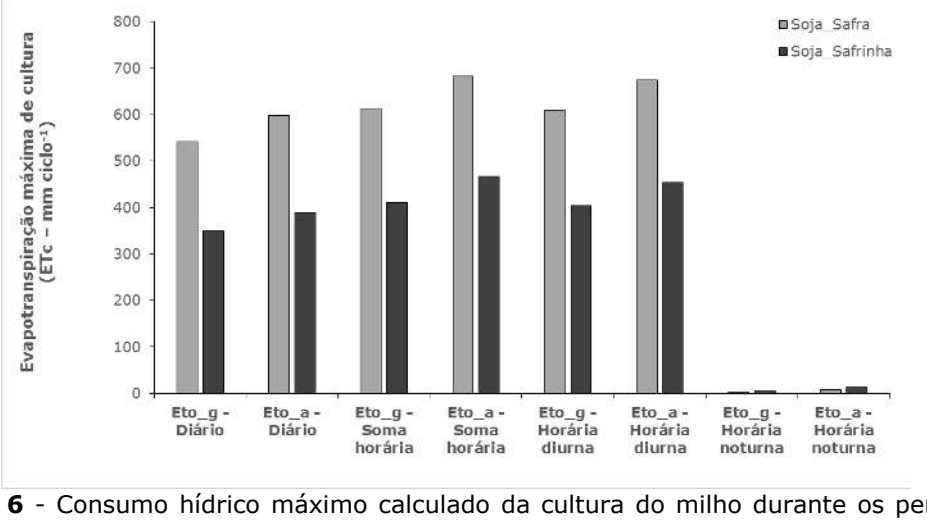


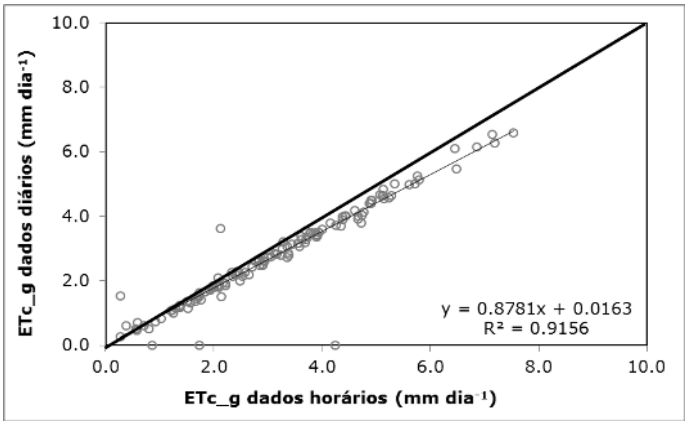
Figura 6 - Consumo hídrico máximo calculado da cultura do milho durante os períodos de safra e safrinha, utilizando-se como variável de entrada a evapotranspiração potencial (ETo) estimada sob diferentes escalas de tempo para superfícies cultivadas com grama e alfafa.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

As figuras de 5 a 10 demonstram que ETo desempenhou um notório impacto sobre ETc de ambas culturas agrícolas estudadas no decorrer de toda estação de crescimento das culturas. Para ambas culturas, verificou-se que a estimativa de ETc foi sempre superior sob superfície cultivada com alfafa. Incrementos nos valores de ETc também foram observados quando a demanda potencial foi calculada a partir da integração de observações meteorológicas horárias.

Em função de discrepâncias nas estimativas de ETo condicionadas pela escala de medida dos elementos meteorológicos locais, observou-se que a diferença no volume de água aplicado na irrigação durante o ciclo produtivo das espécies analisadas ultrapassou os limiares 900m³ e 1.300m³, respectivamente, para a cultura do milho plantado na época da safra e da soja plantada na mesma época. Esse volume de água somado pode chegar a suprir completamente o volume de água exigido por essas mesmas culturas quando cultivadas no período de safrinha. Conforme mencionado, uma boa aferição dos métodos de estimativa comparados a medidas lisimétricas poderia viabilizar, além da economia de água, uma redução no uso de energia e nos impactos ambientais provenientes da prática da irrigação.

Os valores estimados de ETc de ambas culturas estudadas foram confrontados e representados graficamente em função da escala de medida dos elementos meteorológicos locais empregados para cálculo de ETo, com vistas a obtenção de equações de regressão linear simples que pudessem evidenciar o efeito da escala temporal de medida sobre o consumo hídrico das plantas (Figuras 7, 8, 9 e 10).



ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

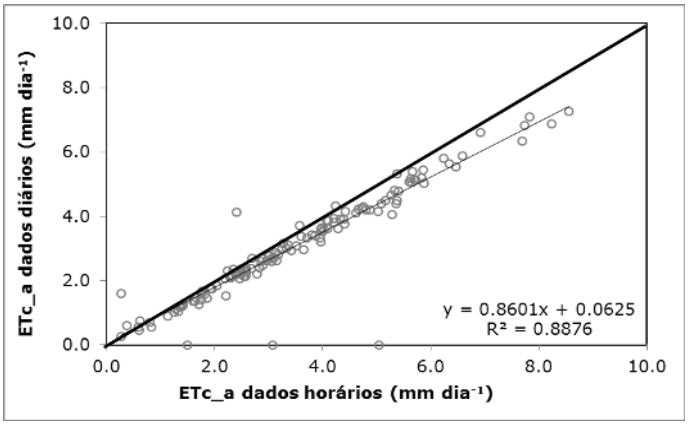


Figura 7 - Evapotranspiração máxima da cultura do milho (ETc) estimada durante o período de safra, utilizando-se ETo diária estimada a partir de medidas diárias dos elementos meteorológicos locais, bem como em função de observações meteorológicas monitoradas na escala horária para superfícies cobertas com grama e alfafa no município de Piracicaba, SP.

De acordo com os gráficos ilustrados nas Figuras de 6 a 9, nota-se que a correlação entre a ETc diária e a ETc horária foi mais estreita no período de safra em comparação ao período de safrinha para ambas as culturas, fato que pode ser confirmado por intermédio de maiores coeficientes de determinação (R^2) associados às equações de regressão linear simples obtidas. Uma provável explicação para essa condição se deve ao fato de que a escala horária de medida considera a evapotranspiração que também ocorre no período noturno, a qual assume menor valor. Na safrinha os dias de ciclo culminam com fotoperíodo menor quando comparados aos dias durante os quais o cultivo de safra se verifica na região estudada, definindo assim menor densidade de fluxo de radiação solar global e baixa demanda evaporativa da atmosfera no período de safrinha. Entretanto, sob escala diária de observações meteorológicas locais que condicionam a demanda potencial pode-se asseverar que a referida escala temporal não atribui peso expressivo a contribuição do período noturno sobre as taxas de ETo.

ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

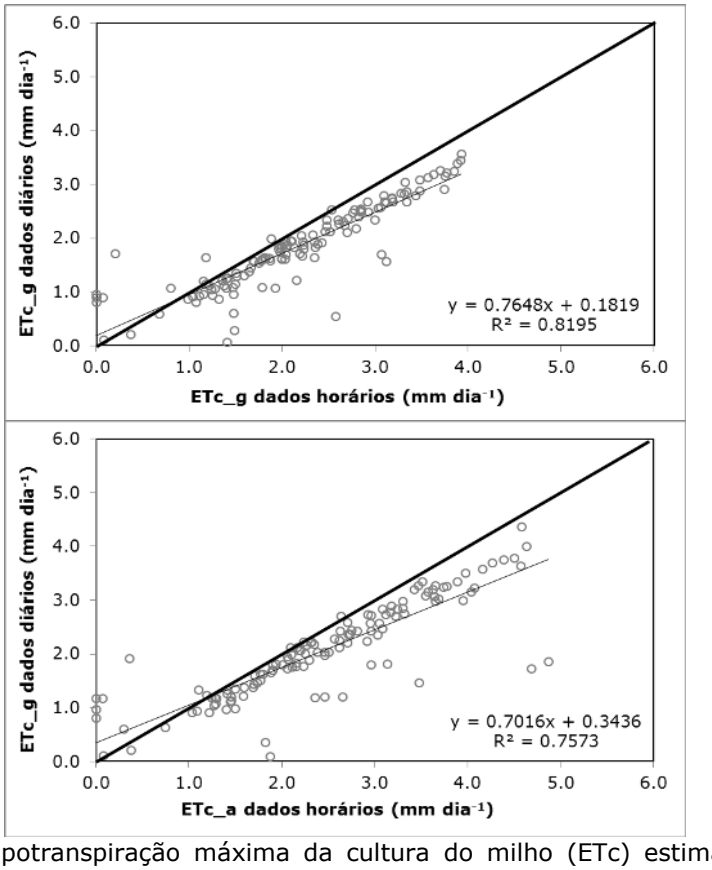
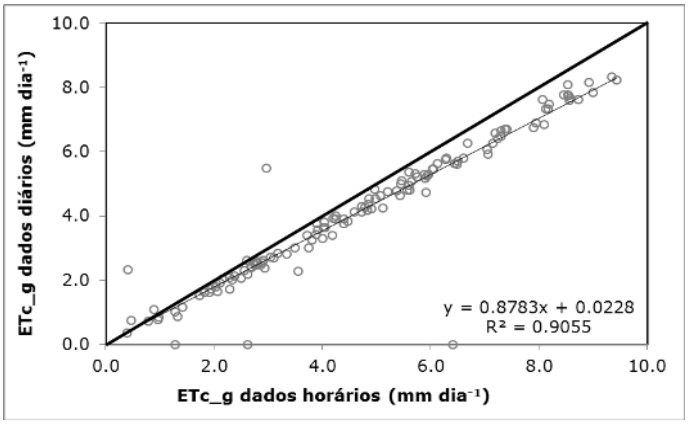


Figura 8 - Evapotranspiração máxima da cultura do milho (ETc) estimada durante o período de safrinha, utilizando-se ETo diária estimada a partir de medidas diárias dos elementos meteorológicos locais, bem como em função de observações meteorológicas monitoradas na escala horária para superfícies cobertas com grama e alfafa no município de Piracicaba, SP.



ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)

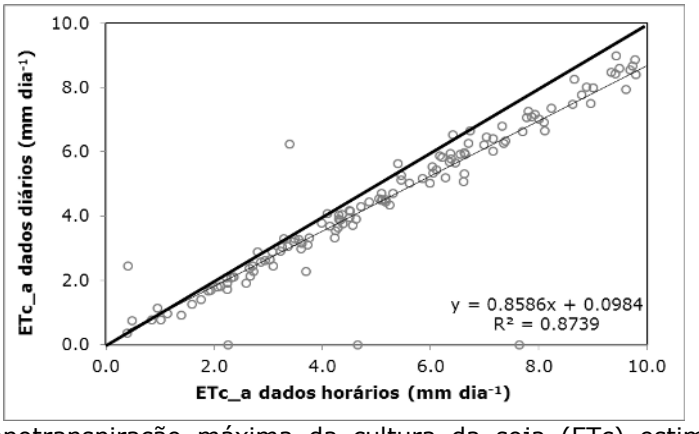


Figura 9 - Evapotranspiração máxima da cultura da soja (ETc) estimada durante o período de safra, utilizando-se ETo diária estimada a partir de medidas diárias dos elementos meteorológicos locais, bem como em função de observações meteorológicas monitoradas na escala horária para superfícies cobertas com grama e alfafa no município de Piracicaba, SP.

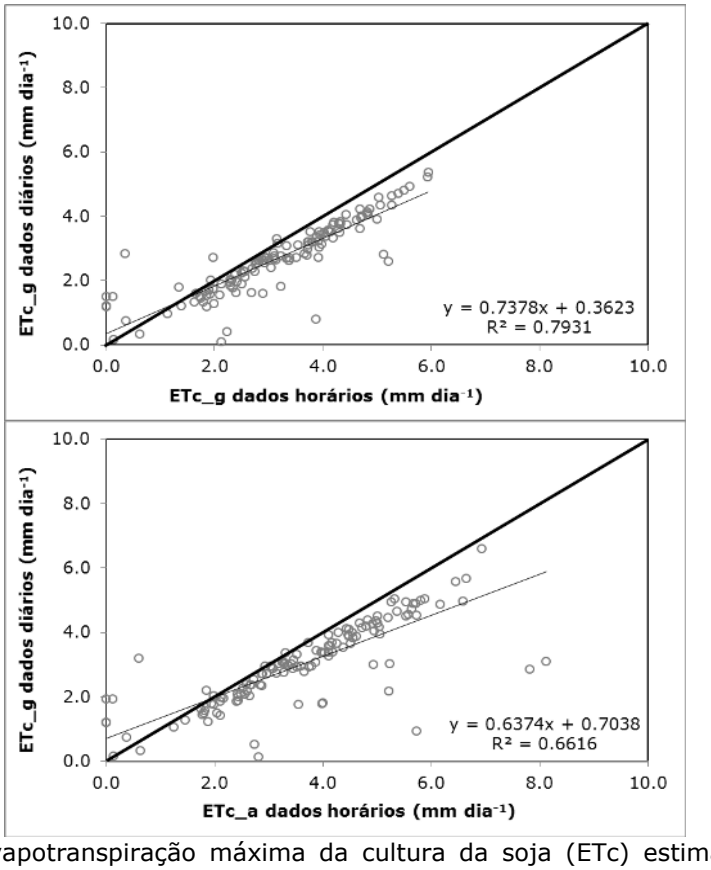


Figura 10 - Evapotranspiração máxima da cultura da soja (ETc) estimada durante o período de safrinha, utilizando-se ETo diária estimada a partir de medidas diárias dos elementos meteorológicos locais, bem como em função de observações meteorológicas monitoradas na escala horária para superfícies cobertas com grama e alfafa no município de Piracicaba, SP.

4. CONCLUSÕES

Sob as condições climáticas reinantes em Piracicaba, SP, durante o período compreendido entre os anos de 2011 e 2014, a estimativa de ETo foi influenciada pelo emprego de diferentes coberturas de referência e pela escala temporal de medida adotada. As taxas de evapotranspiração de referência (ETo) foram superiores sobre superfície cultivada com alfafa, bem como sob escala horária.

O consumo hídrico máximo das culturas de soja e milho foi mais pronunciado quando a ETo fez alusão a superfície vegetada com alfafa e foi quantificada a partir de dados meteorológicos monitorados na escala horária de medida.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ-USP) pela concessão dos dados meteorológicos locais utilizados no presente trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 122, n. 2, p. 97-106, 1996.

ALLEN R.G.; PRUITT W.O.; WRIGHT J.L.; HOWELL T.A.; VENTURA F.; SNYDER R.; ITENFISU D.; STEDUTO P.; BERENGENA J.; YRISARRY J.B.; SMITH M.; PEREIRA L.S.; RAES D.; PERRIER A.; ALVES I.; WALTER I.; ELLIOTT R. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman–Monteith Method. Agricultural Water Manage, v. 81, p.1–22, 2006.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO, 1998. FAO Irrigation and Drainage Paper n.56.

ALLEN, R.G.; SMITH, M.; PERRIER, A.; PEREIRA, L.S. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bulletin, v. 43, n. 2, p. 1-34, 1994.

ALVARES C.A.; STAPE J.L.; SENTELHAS P.C.; DE MORAES GONÇALVES J.L.; SPAROVEK G. Köppens climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, 2013.

BACK, A.J. Variação da evapotranspiração de referência calculada em diferentes intervalos de tempo. Engenharia Agrícola, v. 27, n. 1, p. 139-145, 2007.

BERLATO, M.A. Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul. 1987. 93f. Tese (Doutorado em Meteorologia). Curso de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1987.

DANIEL, J.S.; PORTMANN, R.W.; SOLOMON, S.; MURPHY, D.M. Identifying weekly cycles in meteorological variables: The importance of an appropriate statistical analysis. Journal of Geophysical Research, v. 117, p. 1-14, 2012.

DIAS, H.B.; SENTELHAS, P.C. dimensioning the impact of irrigation on sugarcane yield in Brazil. Sugar Tech, v. 21, p. 29–37, 2019.

DIOS, V.R.; ROY, J.; FERRIO, J.P.; ALDAY, J.G.; LANDAIS, D.; MILCU, A.; GESSLER, A. Processes driving nocturnal transpiration and implications for estimating land evapotranspiration. Scientific Reports, v. 5, p. 1-8, 2015.

EVETT, S.R.; HOWELL, R.W.; TODD, R.W.; SCHNEIDER, A.D.; TOLK, J.A. Alfalfa reference ET measurement and prediction. In Proceedings of the 4th Decennial National Irrigation Symposium, Nov. p. 14-16, 2000, Phoenix.

FANCELI, A.L.; DOURADO NETO, D. Produção de milho. Livraria e Editora Agropecuária, Guaíba, p. 360, 2000.

IRMAK, S.; HOWELL, T.A.; ALLEN, R.G.; PAYERO, J.O.; MARTIN, D.L. Standardized ASCE Penman–Monteith: impact of sum-of-hourly vs. 24-h time step computations at reference weather station sites. Transactions - American Society of Agricultural Engineers, v. 48, p. 1063–1077, 2005.

IRMAK, S.; ALLEN, R.G.; WHITTY, E.B. Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 129, n. 5, p. 360–370, 2003.

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. P. 329 (ASCE Manual and Report on Engineering Practice, 70).

LÉLLIS, B.C.; CARVALHO, D.F.; MARTÍNEZ-ROMERO, A.; TARJUELO, J.M.; DOMÍNGUEZ A. Effective management of irrigation water for carrot under constant and optimized regulated deficit irrigation in Brazil. Agricultural Water Management, v. 192, p. 294-305, 2017.

MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. Theoretical and Applied Climatology, v. 129, p. 1189–1200, 2017.

NOBRE, C.A.; MARENGO, J.A.; SELUCHI, M.E.; CUARTAS, L.A.; ALVES, L.M. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. Journal of Water Resource and Protection, v. 8, p. 252-262, 2016.

NÓIA JÚNIOR, R.S.; SENTELHAS, P.C. Soybean-maize succession in Brazil: Impacts of sowing dates on climate variability, yields and economic profitability. European Journal of Agronomy, v. 103, p. 140-151, 2019.

OLIVEIRA, M.A.A.; CARVALHO, D.F. Estimativa da evapotranspiração de referência e da demanda suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) em Seropédica e Campos, Estado do Rio de Janeiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 2, n. 2, p. 132-135, 1998.

PAREDES, P.; FONTES, J.C.; AZEVEDO, E.B.; PEREIRA, L.S. Daily reference crop evapotranspiration in the humid environments of Azores islands using reduced

data sets: accuracy of FAO-PM temperature and Hargreaves-Samani methods. Theoretical and Applied Climatology, v. 134, p. 595–611, 2018.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDYIAMA, G.C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba, SP: FEALQ, p. 183, 1997.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; VILLA NOVA, N.A.; SENTELHAS, P.C. Estimating a single tree net radiation under grass net radiation and tree leaf area. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 9, n. 2, p. 187-192, 2001.

PERERA, K.C.; WESTERN, A.W.; NAWARATHNA, B.; GEORGE, B. Comparison of hourly and daily reference crop evapotranspiration equations across seasons and climate zones in Australia. Agricultural Water Management, v. 148, p. 84–96, 2015.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; THOMPSOM, H.E.; BENSON, G.O. How soybean plant develops. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1997. P. 20 (Special report, 53).

SENTELHAS, P.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G.; FARIAS, J.; HAMPF, A.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. The Journal of Agricultural Science, v. 153, p. 1394-1411. 2015.

SILVA, B.B.; BRAGA, A.C.; BRAGA, C.C.; OLIVEIRA, L.M.M.; GALVÍNCIO, J.D.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do Semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 47, n. 9, p. 1218-1226, 2012.

SILVA, T.G.F.; ARAÚJO PRIMO, J.T.; SILVA, S.M.S.; MOURA, M.S.B.; SANTOS, D.C.; SILVA, M.C.; ARAÚJO, J.E.M. Indicadores de eficiência do uso da água e de nutrientes de clones de palma forrageira em condições de sequeiro no Semiárido brasileiro. Bragantia, v. 73, p. 184-191. 2014

SILVA, V.P.R.; BELO FILHO, A.F.; SILVA, B.B.; CAMPOS, J.H.B.C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 9, n. 4, p. 547-553, 2005.

SMITH, M. Report on expert consultation on procedures for revision of FAO methodologies for crop water requirements. Rome: FAO, p. 45, 1991.

SMITH, M.; ALLEN, R.; MONTEITH, J.L.; PERRIER, A.; PEREIRA, L.S.; SEGEREN, A. Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Rome: FAO, p. 59, 1990.

VENTURA, F.; SPANO, D.; DUCE, P.; SNYDER, R.L. An evaluation of common evapotranspiration equations. Irrigation Science, v. 18, p. 163–170, 1999.

WALTER, I.A.; ALLEN, R.G.; ELLIOTT, R.; JENSEN, M.E.; ITENFISU, D.; MECHAM, B., HOWELL, T.A.; SNYDER, R.; BROWN, P.; ECHINGS, S.; SPOFFORD, T.; HATTENDORF, M.; CUENCA, R.H.; WRIGHT, J.L.; MARTIN, D. The ASCE's standardized reference evapo-transpiration equation. ASCE-EWRI Task Committee Report. The American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2005.

XU, C.Y.; SINGH, V.P. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. Water Resources Management, v. 16, n. 3, p. 197-219, 2002.

XU, C.Y.; SINGH, V.P. Evaluation and generalization of temperature based methods for calculating evaporation. Hydrological Processes, v. 15, n. 2, p. 305-319, 2001.

WANG K.; DICKINSON R. E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. Reviews of Geophysics, v. 50, p. 1-54, 2012.

WEINDL, I.; BODIRSKY, B.L.; ROLINSKI, S.; BIEWALD, A.; LOTZE-CAMPEN, H.; MÜLLER, C.; DIETRICH, J.P.; HUMPENÖDER. F.; STEVANOVIĆ, M.; SCHAPHOFF, S.; POPP, A. Livestock production and the water challenge of future food supply: Implications of agricultural management and dietary choices. Global Environmental Change, v. 47, p. 121-132, 2017