



ESTIMATIVA SIMPLIFICADA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Edmar José Scaloppi¹, Carlos Jesús Baca Garcia²

RESUMO

Durante o período caracterizado pela seca edafológica estacional, que ocorre em muitas regiões, a condição climática assume um comportamento razoavelmente conservador. Esse comportamento recorrente favorece a estimativa de valores típicos diários representativos da evapotranspiração de referência, simplificando o cálculo da demanda hídrica para as culturas irrigadas nessas regiões, bastando, apenas, introduzir coeficientes de cultura recomendados pela experimentação local, ou disponibilizados em publicações especializadas. Neste trabalho, a evapotranspiração de referência diária (ET_o) foi computada pelo método de Penman-Monteith, empregando-se os valores das variáveis pertinentes registrados na Estação Meteorológica Automática da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP, em Piracicaba, SP, durante o período de 1º de abril a 29 de setembro (26 semanas) entre 1997 e 2014 (18 anos). A partir dos valores de ET_o, foram computadas as médias semanais com probabilidades de ocorrência de 75, 80, 85, 90 e 95%. Os resultados foram ajustados a equações do segundo grau, com pequenas dispersões na tendência revelada. A consistência dos resultados obtidos permite recomendar seu emprego para estimar, com precisão aceitável, a demanda hídrica das culturas irrigadas, de uma forma simples e conveniente, em função dos valores adequados, atribuídos aos coeficientes das culturas de interesse praticadas nas regiões onde os resultados poderiam ser representativos.

Palavras-chave: demanda hídrica, clima recorrente, irrigação.

SIMPLIFIED ESTIMATE OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION

ABSTRACT

During the period characterized by the seasonal drought in many places, it can be observed that the prevailing climatic condition reveals a reasonably conservative trend. This recurring condition acts in favor of calculating daily values of reference evapotranspiration - ET_o, which considerably simplify the estimative of the water demand for irrigated crops. In this case it is only required the use of recommended crop coefficients obtained from either local experimentation or those published in the related literature. In the present work, the daily ET_o was calculated by the Penman-Monteith method by inputting the required variables registered

¹Professor, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Unesp, Botucatu, SP, edmar@fca.unesp.br

² Professor, Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú, carlos-bacagarcia@yahoo.es

at the Automated Meteorological Station of the “Luiz de Queiroz” College of Agriculture - ESALQ/USP, in Piracicaba, SP, during the period of April 1st to September 29 (26 weeks), from 1997 to 2014 (18 years). Therefore, from the above average computed daily ETo values, it was calculated the 7-day average for probabilities of occurrence of 75, 80, 85, 90 and 95%. The results were adjusted to a second degree equation to represent the revealed trend, which endorses the possibility to estimate the water demand of irrigated crops in a simple and convenient procedure, as a function only of the crop coefficients for each crop of interest growing in the region where the results may be representative.

Keywords: crop water demand, recurring climate, irrigation.

INTRODUÇÃO

Uma pesquisa conduzida pelo Agricultural Water Management Council and California Water Coalition (2010) sobre os procedimentos praticados pelos agricultores nas culturas irrigadas no Vale de San Joaquín, no Estado da Califórnia, EUA, revelou que a maioria deles não utiliza métodos científicos para orientar o manejo das irrigações. A principal razão para justificar essa decisão foi atribuída ao custo relativamente elevado da informação, mesmo considerando que os agricultores daquela região dispõem, gratuitamente, desde 1978, de informações fornecidas pelo programa CIMIS (California Irrigation Management Information System) que administra uma rede estadual, integrada com mais de 125 estações meteorológicas automáticas, para estimar o consumo de água das culturas e utilizar na programação das irrigações.

Por outro lado, durante a principal estação de irrigação, em muitas regiões brasileiras, tem sido observado um comportamento recorrente das condições micrometeorológicas que determinam a evapotranspiração de referência, caracterizado, principalmente, pela previsibilidade da radiação solar incidente, em

função da reduzida nebulosidade que prevalece nesta estação. Assim, em períodos relativamente curtos, essa condição não sofre modificações significativas, mantendo aproximadas, a intensidade de radiação atmosférica recebida pela superfície vegetada, bem como a grandeza dos outros elementos micrometeorológicos determinantes do processo de perda de água pelas superfícies vegetadas.

Dessa maneira, é oportuno estimar a demanda evapotranspiratória diária, em períodos típicos semanais, quinzenais ou mensais, através de procedimentos simplificados, para estimular sua utilização, tanto no dimensionamento quanto no manejo das irrigações praticadas nessas regiões. Para tanto, bastaria apenas introduzir os coeficientes de cultura, em geral, localmente determinados, ou então amplamente difundidos na literatura especializada.

Este trabalho apresenta um procedimento simples capaz de estimar a evapotranspiração de referência em base diária, com diferentes probabilidades de ocorrência, empregando-se equações do segundo grau, ajustadas aos valores calculados em períodos semanais, empregando-se a equação de Penman-Monteith.

MATERIAL E MÉTODOS

Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo)

A evapotranspiração de referência foi calculada pela equação de Penman-Monteith, que associa os processos físicos de balanço de energia e transferência de vapor, para estimar a perda de água de uma superfície vegetada com

grama, expressa por:

$$\rho \lambda ETo = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho_{ar} c_p (e_z^o - e_z) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)} \quad (1)$$

em que,

ρ - massa específica da água (kg m^{-3});

λ - calor latente de vaporização da água (MJ kg^{-1});

ESTIMATIVA SIMPLIFICADA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

E_{To} - evapotranspiração da cultura de referência (grama) ($m\ d^{-1}$);

Δ - inclinação da curva de variação da pressão de saturação de vapor com a temperatura (de^o/dt), em função da temperatura média do ar atmosférico ($kPa\ ^oC^{-1}$);

γ - constante psicrométrica ($kPa\ ^oC^{-1}$);

R_n - fluxo de energia radiante para a superfície, ou radiação líquida ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$);

G - fluxo de calor para o solo ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), desprezível em períodos superiores a 1 dia;

ρ_{ar} - massa específica do ar ($kg\ m^{-3}$);

c_p - calor específico volumétrico do ar úmido à pressão constante ($MJ\ kg^{-1}\ ^oC^{-1}$);

e_z^o e e_z - tensão de saturação e atual do vapor de água no ar, respectivamente (kPa);

γ^* - constante psicrométrica ($kPa\ ^oC^{-1}$);

r_c e r_a - resistência do dossel vegetativo à transferência de vapor, e resistência aerodinâmica à transferência do calor sensível e do vapor de água ($d\ m^{-1}$).

A equação de Penman-Monteith tem sido reconhecida como fisicamente consistente para estimativa da evapotranspiração, mesmo em condições com induzida deficiência hídrica imposta às culturas (Hatfield & Allen, 1996). Os

detalhes para sua aplicação estão disponibilizados na página da University of Idaho & Allen (2011). Há muitas décadas, essa equação tem sido extensivamente recomendada para representar a evapotranspiração de uma superfície vegetada com grama, como cultura de referência, para períodos diários, com as seguintes características: albedo = 0,23, altura = 0,12 m e resistência superficial = $70\ s\ m^{-1}$. Em nossas condições, diversos pesquisadores, entre os quais Carvalho et al. (2011) enfatizaram sua vantajosa aplicação entre vários métodos comparados.

A radiação líquida (R_n) foi estimada a partir da radiação solar através da equação:

$$R_n = R_s(1 - \alpha) - R_b \quad (2)$$

em que:

α - albedo da superfície vegetada com grama, assumido constante e igual a 0,23, e

R_b - radiação total em ondas longas (ou radiação térmica) transmitida para o ar atmosférico através da superfície ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$).

O valor de R_b , por sua vez, pode ser estimado pela equação:

$$R_b = \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35\right) (0,34 - 0,14\sqrt{e_a})\sigma(T_{max}^4 + T_{min}^4)0,5 \quad (3)$$

em que:

R_{so} - radiação solar na ausência de nebulosidade ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$);

e_a - pressão de vapor média às temperaturas máxima e mínima do ar atmosférico (kPa);

σ - constante de Stefan-Boltzmann ($4,903\ 10^{-9}\ MJ\ m^{-2}\ K^{-4}\ d^{-1}$);

T_{max} e T_{min} - temperaturas máxima e mínima do ar (K).

A avaliação desses e dos demais parâmetros requeridos pela equação de Penman-Monteith seguiram as recomendações sugeridas por Allen (1986) e detalhadas no manual divulgado pela University of Idaho & Allen (2011).

Os dados meteorológicos requeridos nesse trabalho foram obtidos a partir dos registros

publicados pela Estação Meteorológica Automática do Posto Agrometeorológico da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, em Piracicaba, SP, localizado a $22^o\ 42'\ 30''\ S$ e $47^o\ 38'\ 30''\ W$ com 546 m de altitude. Os registros foram realizados durante o período de 1º de abril a 29 de setembro (182 dias ou 26 semanas) entre 1997 e 2014. Os dados omissos naqueles registros foram substituídos pelos valores correspondentes, obtidos na Estação Meteorológica Convencional, ambos disponibilizados online.

Para caracterizar a condição micrometeorológica que prevalece nos meses de abril a setembro, inicialmente foram calculados os valores diários da E_{To} , utilizando-se um programa computacional desenvolvido na linguagem Turbo C. Esses dados foram

analisados em intervalos semanais para a determinação dos valores médios. Em seguida, os valores semanais foram sistematizados em ordem crescente para identificar os percentuais de probabilidade de ocorrência considerados, a saber, 75, 80, 85, 90 e 95%, utilizando-se o Método Califórnia. Para satisfazer os níveis de probabilidade pré-estabelecidos, tornou-se

necessário adotar procedimentos de interpolação linear, a partir dos valores próximos àqueles previamente especificados. Em seguida, os valores calculados em cada classe percentual foram submetidos às análises de regressão, sendo que os ajustamentos mais adequados corresponderam às equações do segundo grau.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos estão graficamente representados nas Figuras 1 a 5.

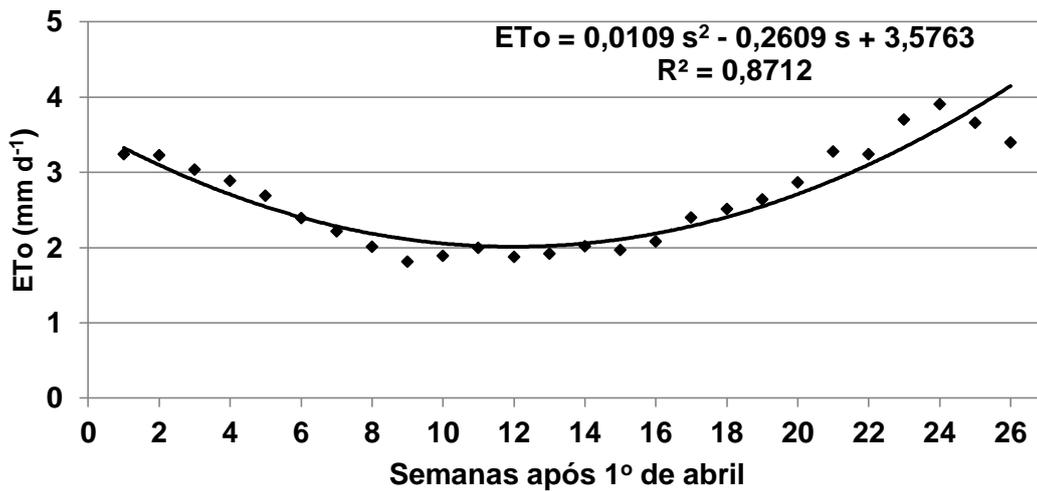


Figura 1. Evapotranspiração de referência, calculada a 75% de probabilidade, durante as 26 semanas incluídas no presente trabalho.

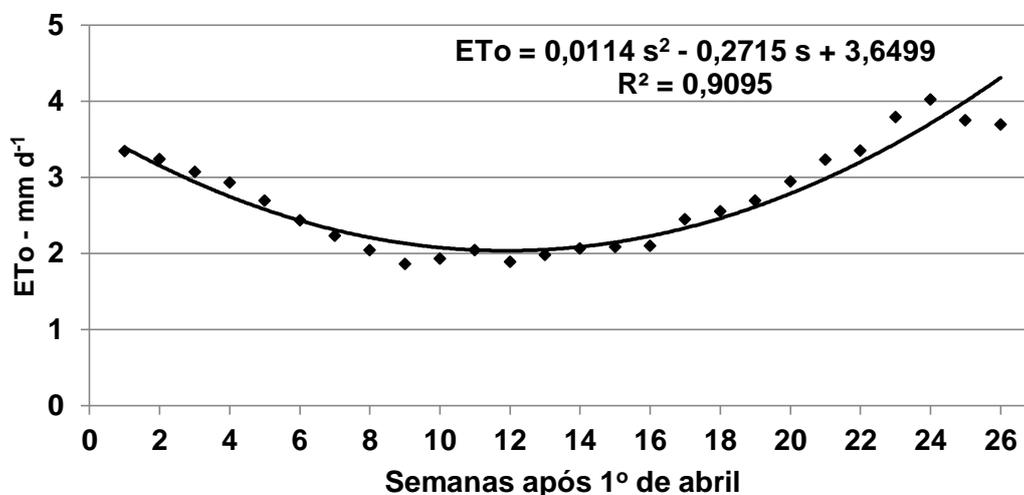


Figura 2. Evapotranspiração de referência, calculada a 80% de probabilidade, durante as 26 semanas incluídas no presente trabalho.

ESTIMATIVA SIMPLIFICADA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

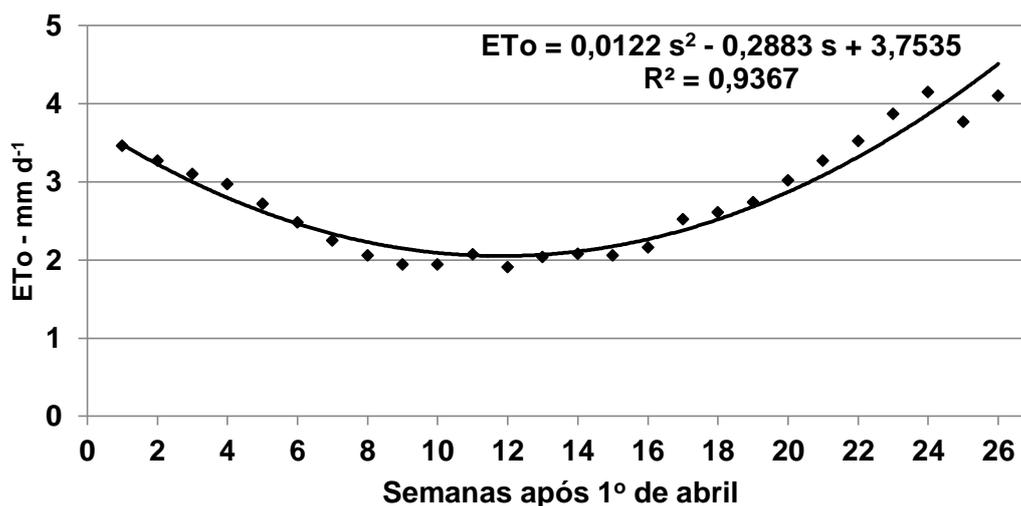


Figura 3. Evapotranspiração de referência, calculada a 85% de probabilidade, durante as 26 semanas incluídas no presente trabalho.

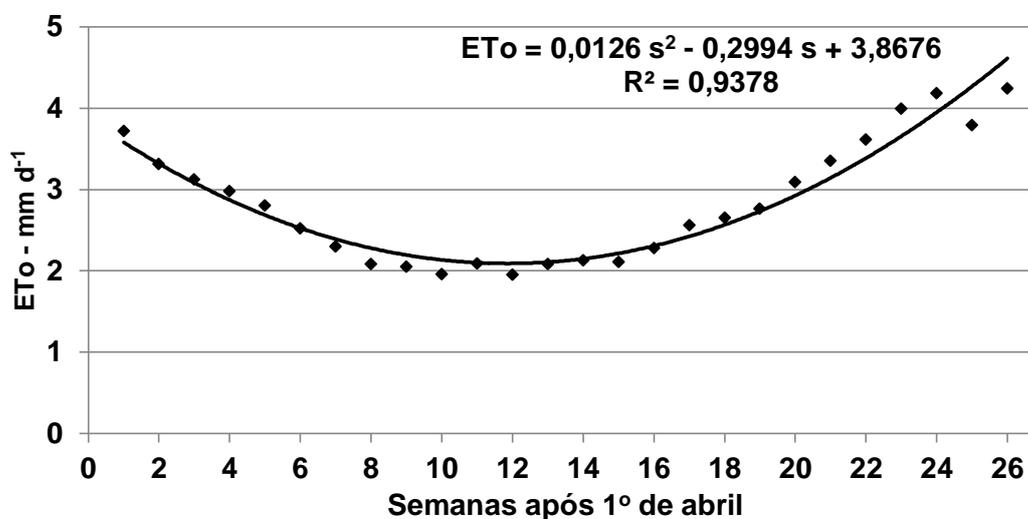


Figura 4. Evapotranspiração de referência, calculada a 90% de probabilidade, durante as 26 semanas incluídas no presente trabalho.

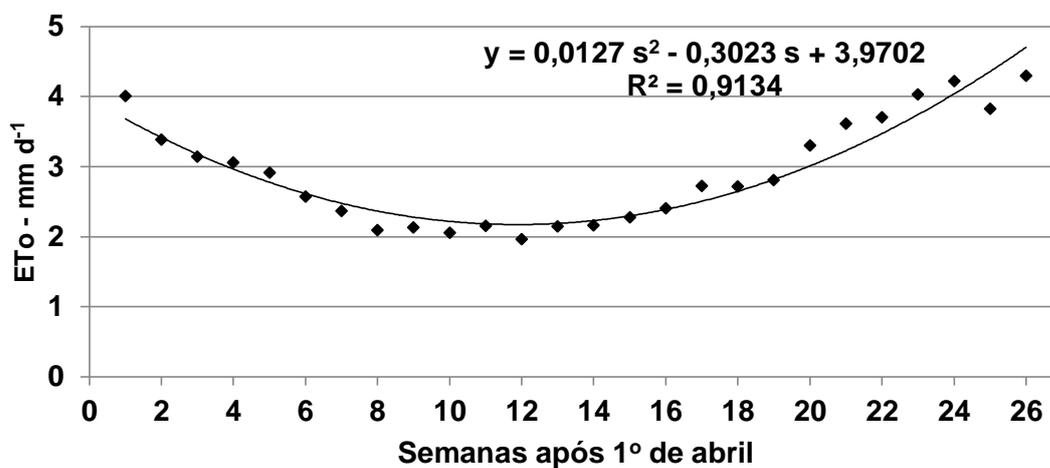


Figura 5. Evapotranspiração de referência, calculada a 95% de probabilidade, durante as 26 semanas incluídas no presente trabalho.

Através de análises de regressão aplicadas aos dados da evapotranspiração de referência registrados nas Figuras 1 a 5, observou-se que as

seguintes equações do segundo grau, com os respectivos coeficientes de determinação, apresentaram um melhor ajustamento aos dados:

$$75\%: ETo = 0,0109 s^2 - 0,2609 s + 3,5763 \quad R^2 = 0,87 \quad (4)$$

$$80\%: ETo = 0,0114 s^2 - 0,2715 s + 3,6499 \quad R^2 = 0,91 \quad (5)$$

$$85\%: ETo = 0,0122 s^2 - 0,2883 s + 3,7535 \quad R^2 = 0,94 \quad (6)$$

$$90\%: ETo = 0,0126 s^2 - 0,2994 s + 3,8676 \quad R^2 = 0,94 \quad (7)$$

$$95\%: ETo = 0,0127 s^2 - 0,3023 s + 3,9702 \quad R^2 = 0,91 \quad (8)$$

em que:

ETo - evapotranspiração de referência (mm d⁻¹);

s - número de semanas após o dia 1º de abril até o dia 29 de setembro, totalizando, portanto, as 26 semanas incluídas na presente investigação. Os erros padrões das estimativas calculadas por essas equações foram 0,28, 0,25, 0,22, 0,22 e 0,27 mm d⁻¹, respectivamente, para níveis de probabilidade de 75, 80, 85, 90 e 95%. Esses valores podem ser considerados satisfatórios para os objetivos propostos neste trabalho.

Empregando-se as equações ajustadas obtidas, foram calculados os valores máximos, que ocorreram sistematicamente na última semana de setembro, revelando os seguintes resultados: 4,16, 4,3, 4,5, 4,6 e 4,7 mm d⁻¹ para níveis de probabilidade de 75, 80, 85, 90 e 95%, respectivamente.

Por outro lado, o número de semanas decorridas até a ocorrência do menor valor de ETo foi calculado a partir das derivadas das equações 4 a 8 representadas a seguir:

$$0,0218 s - 0,2609 = 0 \quad (9)$$

$$0,0228 s - 0,2715 = 0 \quad (10)$$

$$0,0244 s - 0,2883 = 0 \quad (11)$$

$$0,0252 s - 0,2994 = 0 \quad (12)$$

$$0,0254 s - 0,3023 = 0 \quad (13)$$

Os resultados indicaram que os valores mínimos de ETo, para os cinco níveis de probabilidade considerados, ocorrem na 12ª semana, precisamente aos 81 dias a partir de 1º de abril e, portanto, aos 20 dias do mês de junho. Esse momento coincide com a ocorrência do solstício de inverno, quando a intensidade de radiação solar atinge o menor valor anual. Substituindo-se nas equações 9 a 13 os valores de “s” correspondentes, calculados nas equações 4 a 8, foram obtidos os valores mínimos de ETo computados no período: 2,01, 2,03, 2,05, 2,09, 2,17 mm d⁻¹, nos níveis de probabilidade considerados nas respectivas equações.

A integração, por partes, das equações do segundo grau obtidas, permite avaliar o consumo hídrico de uma cultura em seu máximo crescimento (assumindo-se um coeficiente de cultura unitário) durante o período de 1º de abril a 29 de setembro (26 semanas ou 182 dias) e os valores médios correspondentes, conforme demonstrados a seguir:

$$\int ETo = a 26^3/3 - b 26^2/2 + c 26 \quad (14)$$

Substituindo-se os coeficientes a, b e c obtidos nas equações 4 a 8, na equação 14, obtém-se os seguintes valores totais e médios correspondentes registrados na Tabela 1.

ESTIMATIVA SIMPLIFICADA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Tabela 1. Valores da ETo totais (mm) e médios (mm d⁻¹) obtidos nos cinco níveis de probabilidade considerados.

Probabilidade	75%	80%	85%	90%	95%
ETo total	480,6	489,4	501,3	512,3	528,2
ETo médio	2,64	2,69	2,75	2,81	2,90

Pode-se observar nas Figuras 1 a 5, que os valores da ETo no primeiro dia de abril variaram de 3,6 a 4 mm d⁻¹, para níveis de probabilidade de 75 a 95%. Após a última semana incluída na presente análise, é esperado o início da estação chuvosa na região, diminuindo, portanto, a importância da irrigação como forma de assegurar a produtividade das culturas, além de aumentar a imprevisibilidade da demanda hídrica devido à maior nebulosidade observada nessa estação.

É importante destacar os elevados valores dos coeficientes de determinação obtidos nas equações de regressão ajustadas (R²), entre 0,87 e 0,94, os quais, associados aos reduzidos erros padrões das estimativas, variáveis entre 0,22 e 0,28 mm d⁻¹, reforçam a validade da hipótese de recorrência das condições meteorológicas durante o período incluído neste trabalho.

CONCLUSÕES

- 1) É possível obter uma estimativa razoavelmente precisa da evapotranspiração de referência, durante o período de abril a setembro, caracterizado pela estação seca edafológica regional, quando as condições climáticas revelam-se relativamente recorrentes, utilizando as equações do segundo grau obtidas.
- 2) A partir dos dados calculados da ETo, pode-se obter a demanda hídrica das culturas irrigadas, bastando empregar coeficientes específicos para as culturas de interesse, obtidos através de experimentação local, ou disponibilizados na literatura especializada.

- 3) Os valores máximos e mínimos semanais, bem como o somatório da evapotranspiração durante o período de 1º de abril a 29 de setembro, puderam ser calculados a partir das equações de regressão obtidas em cada percentual de probabilidade considerada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agricultural Water Management Council and California Water Coalition. Irrigation Practices and Influencers Survey Findings. San Joaquin Valley, 2010, www.agwatercouncil.org/08312010.pdf, acesso em 10/06/2013.

ALLEN, R.G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v. 112, n. 4, p. 348-368, 1986.

HATFIELD, J.L.; ALLEN, R.G. Evapotranspiration estimates under deficient water supplies. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v. 122, n. 5, p. 301-308, 1996.

UNIVERSITY OF IDAHO; ALLEN, R.G. REF-ET: Reference Evapotranspiration Calculation Software for FAO and ASCE Standardized Equations, 2011, Version 3.1 for Windows. <http://www.kimberly.uidaho.edu/refet/index.old.htm>, acesso em 22/09/2013.

CARVALHO, L.G.; RIOS, G.F.A.; MIRANDA, W.L.; NETO, P.C. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.