

## DESEMPENHO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O MUNICÍPIO DE RIO VERDE-GO

Guilherme Henrique Terra Cruz<sup>1</sup>, Lucas da Costa Santos<sup>2</sup>, Sandra Máscimo da Costa Silva<sup>3</sup>,  
Elton Fialho dos Reis<sup>4</sup>

### RESUMO

A baixa densidade de estações meteorológicas completas na maioria das regiões do Brasil tem demandado estudos comparativos entre as várias equações de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), particularmente entre aquelas que necessitam de um menor número de elementos meteorológicos. Diante disso, objetivou-se com esse trabalho, avaliar o desempenho de algumas equações empíricas usadas para estimar a ET<sub>o</sub> em relação ao método padrão de Penman-Monteith/FAO-56 para as condições climáticas do município de Rio Verde/GO. Os dados meteorológicos para o cálculo da ET<sub>o</sub> foram coletados do Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás – SIMEHGO referentes aos anos de 2005 a 2015. O desempenho dos métodos foi avaliado pelos seguintes parâmetros: coeficientes da equação de regressão ( $\beta_0$  e  $\beta_1$ ), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente de correlação ( $r$ ), estimativa do erro padrão (EEP), índice de concordância ( $d$ ) e o índice de desempenho ( $c$ ). Para as condições climáticas do local, em função dos parâmetros estatísticos avaliados, os melhores métodos para estimar a ET<sub>o</sub> foram os de Turc (1961) e Radiação/FAO-24, classificados como ótimo e muito bom, respectivamente. O método de Priestley-Taylor não é indicado para a localidade de estudo por possuir desempenho sofrível.

**Palavras-chave:** Demanda hídrica, Manejo da irrigação, Equações empíricas.

## PERFORMANCE OF EMPIRICAL METHODS IN THE ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION OF REFERENCE FOR THE CITY OF RIO VERDE-GO

### ABSTRACT

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Goiás - UEG, e-mail: guilerghtech@gmail.com

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia de Sistemas Agrícolas, Pós-doutorando na Universidade Estadual de Goiás – UEG, e-mail: lucas.cs21@gmail.com

<sup>3</sup> Doutora em Agronomia, Professora Titular da Universidade Estadual de Goiás – UEG, e-mail: sandramascimo@hotmail.com

<sup>4</sup> Doutor em Engenharia Agrícola, Professor da Universidade Estadual de Goiás – UEG, e-mail: fialhoreis@ueg.br

The low density of complete meteorological stations in most regions of Brazil has demanded comparative studies among the various estimation equations of reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>), particularly among those that require a smaller number of meteorological elements. The purpose of this work was to evaluate the performance of some empirical equations used to estimate the ET<sub>o</sub> in relation to the Penman-Monteith/FAO-56 standard method for the climatic conditions of the city of Rio Verde, Goiás State, Brazil. The meteorological data for the calculation of ET<sub>o</sub> were collected from the Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás (SIMEHGO) for the years 2005 to 2015. The performance of the methods was evaluated by the following parameters: coefficients of the regression equation ( $\beta_0$  and  $\beta_1$ ), coefficient of determination ( $r^2$ ), correlation coefficient ( $r$ ), estimation of standard error (ESE), agreement index ( $d$ ) and performance index ( $c$ ). For the climatic conditions of the site, according to the statistical parameters evaluated, the best methods to estimate ET<sub>o</sub> were Turc (1961) and Radiation/FAO-24, classified as excellent and very good, respectively. The Priestley-Taylor method is not indicated for study location because it has poor performance.

**Keywords:** Water demand, Irrigation management, Empirical equations.

## INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) é um processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera e é resultado do efeito combinado da evaporação da água presente nas superfícies do solo e das plantas, juntamente com a água transpirada pelos tecidos vegetais. Quantificar adequadamente a ET é essencial para identificar as necessidades hídricas das culturas e com isso obter base para um eficiente manejo de irrigação (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

De acordo com Allen et al. (1998), a determinação da ET é difícil e dispendiosa, por depender de fatores ligados à cultura e ao solo, além dos elementos meteorológicos; dessa maneira, é prática comum a utilização de modelos matemáticos para sua estimativa, com os quais determina-se a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), que é a versão padronizada de ET para condições ambientais hipotéticas, levando-se em consideração apenas as variáveis meteorológicas da localidade de interesse.

Dentre os métodos de estimativa da ET<sub>o</sub>, existem aqueles mais complexos, como o de Penman-Monteith/FAO-56 (ALLEN et al., 1998), que necessitam de uma maior quantidade de variáveis meteorológicas para sua utilização, o que muitas vezes limita seu uso pela maioria dos produtores rurais, que normalmente dispõe de dados limitados de clima. Nestas condições, pode-se lançar mão de modelos mais simples, como o de Hargreaves-Samani, o qual baseia-se

apenas em valores de temperatura do ar. No entanto, Pereira et al. (2009), recomendam que antes de aplicar um método é necessário verificar seu desempenho, afim de minimizar erros de estimativa.

A análise de desempenho através de um conjunto de indicadores estatísticos como: índice de concordância ( $d$ ), coeficiente de correlação ( $r$ ) e índice de desempenho ( $c$ ) possui acurácia satisfatória. Particularmente para o coeficiente de correlação, Camargo e Sentelhas (1997) constatam que esse indicador é imprescindível, pois indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, ou seja, o erro aleatório. A exatidão dos métodos se relaciona ao afastamento dos valores estimados em relação ao padrão e essa exatidão é indicada pelo índice de concordância ( $d$ ). Adicionalmente, estes mesmos autores propuseram o uso do índice de desempenho, sendo ele um produto entre o índice de concordância e o coeficiente de correlação, o que culmina em uma análise de performance do método avaliado.

Dentre as principais regiões brasileiras com perfil agrícola, o Estado de Goiás tem-se destacado em âmbito nacional, vindo inclusive a se tornar o quarto maior produtor de grãos do País no ano de 2015 (IMB, 2017). O potencial do Estado como fornecedor de alimentos é justificado pela abundância de terras com topografia favorável a mecanização e também pela boa disponibilidade hídrica, o que confere

aos produtores goianos adequadas condições na exploração de seus cultivos. No entanto, especificamente em relação ao potencial hídrico da região, estudos de gestão desse importante recurso são constantemente necessários, para que a oferta de água seja assegurada não apenas para a agricultura, mas também aos outros setores que dela dependem.

Diante do exposto e da importância da identificação de equações que representem a demanda evapotranspirométrica de uma região de forma confiável, objetivou-se com este trabalho avaliar o comportamento dos métodos de Turc (1961), Radiação/FAO-24, Blaney-Criddle/FAO-24, Penman Modificado/FAO-24, Hargreaves-Samani (1985) e Priestley-Taylor para a determinação da evapotranspiração de referência, e correlacioná-los com o método padrão Penman-Monteith/FAO-56 para as condições climáticas do município de Rio Verde/GO, importante produtor de grãos do Estado.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O município de Rio Verde encontra-se localizado nas coordenadas de latitude 17° 47' 53" Sul; longitude 51° 55' 53" Oeste e altitude média 748 m. Quanto à classificação climática, de acordo com critérios propostos por Köppen, a localidade possui clima do tipo Aw (Tropical de Savana), com inverno seco e verão chuvoso, temperatura média anual oscilando entre 20 e 25°C e média pluviométrica anual acima de 1500 mm.

Para a estimativa da ETo foram obtidos dados da plataforma automática de coleta de dados do Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás – SIMEHGO, onde se utilizou as seguintes variáveis meteorológicas: radiação solar ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ), temperatura máxima, mínima e média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa média do ar (%), velocidade média do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e pressão atmosférica (hPa), referentes aos anos de 2005 a 2015. Com o propósito de tornar os dados meteorológicos utilizados mais homogêneos, foram eliminadas aquelas informações discrepantes, incompletas ou inconsistentes.

Foi utilizado o programa computacional REF-ET (ALLEN, 2000) para a estimativa da ETo pelos métodos: Penman Modificado/FAO-24, Radiação/FAO-24, Blaney-Criddle/FAO-24, Hargreaves-Samani (1985), Priestley-Taylor e Turc (1961), os quais foram comparados com o método padrão Penman-Monteith/FAO-56, na escala diária.

Com os dados diários da ETo realizou-se análise de regressão onde correlacionou-se os valores obtidos pelos métodos testados com os do método padrão. A análise de desempenho foi baseada nos seguintes parâmetros: coeficientes da equação de regressão ( $\beta_0$  e  $\beta_1$ ), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente de correlação ( $r$ ), estimativa do erro padrão (EEP) e o índice de desempenho ( $c$ ) obtido a partir do produto entre o coeficiente de correlação e o índice de concordância.

A precisão foi dada pelo coeficiente de determinação, a qual indica o grau em que a regressão explica a soma do quadrado total. A aproximação dos valores de ETo estimados por determinado método estudado, em relação aos valores obtidos com uso do método padrão, foi obtida por um índice, designado de concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (WILLMOTT et al., 1985). Seus valores variam desde zero, onde não existe concordância, a 1, para a concordância perfeita. O índice de aproximação é calculado aplicando-se a seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|P_i - \bar{O}|) + (|O_i - \bar{O}|)]^2}$$

Em que,

d = índice de concordância ou ajuste;

$P_i$  = evapotranspiração de referência obtida pelo método considerado,  $\text{mm dia}^{-1}$ ;

$O_i$  = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão,  $\text{mm dia}^{-1}$ ;

$\bar{O}$  = média dos valores de ETo obtido pelo método-padrão,  $\text{mm dia}^{-1}$ ; e n = número de observações.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados comparativos entre os valores de evapotranspiração de referência

obtidos pelos métodos estudados com os valores estimados pelo método Penman-Monteith/FAO-

56 para o município de Rio Verde/GO encontram-se na Tabela 1.

**Tabela 1.** Parâmetros de regressão ( $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente de correlação ( $r$ ), estimativa do erro padrão (EEP), índice de concordância ( $d$ ) e índice de confiança ou desempenho ( $c$ ) para valores de ETo diários no município de Rio Verde/GO, no período de 2005 a 2015.

Métodos	Parâmetros estatísticos							Classificação <sup>#</sup>	ET <sub>0</sub> (mm dia <sup>-1</sup> )
	$\beta_0$	$\beta_1$	$r^2$	EEP	$r$	$d$	$c$		
PM FAO 56	-	-	-	-	-	-	-	-	3,66
Penman Mod.	0,18	1,20	0,98	0,92	0,99	0,70	0,69	Bom	4,56
Turc	1,13	0,68	0,89	0,25	0,94	0,94	0,89	Ótimo	3,61
Radiação	0,52	0,97	0,89	0,48	0,94	0,87	0,82	Muito Bom	4,08
Hargr.-Samani	0,49	1,04	0,76	0,72	0,87	0,76	0,66	Bom	4,28
Blaney-Criddle	0,98	0,78	0,65	0,42	0,80	0,87	0,70	Bom	3,85
Priestley-Taylor	0,74	0,79	0,44	0,56	0,66	0,81	0,53	Sofrível	3,63

<sup>#</sup>Camargo e Sentelhas (1997)

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 1, verifica-se que os métodos avaliados apresentaram desempenho variando de “Sofrível” a “Ótimo” para estimativa da ETo na escala diária, e que à exceção dos métodos de Priestley-Taylor e Turc, todos os métodos superestimaram os valores de ETo obtidos pelo método padrão.

A equação que apresentou melhor estimativa foi a proposta por Turc (1961), com desempenho “Ótimo” e concordância quase perfeita ( $d = 0,94$ ), apresentando baixo valor de subestimativa ( $0,05 \text{ mm dia}^{-1}$ ). Seu desempenho se deve ao fato do modelo levar em consideração valores de radiação, temperatura e fotoperíodo. Em estudos conduzidos por Bragança et al. (2010), em várias localidades do estado do Espírito Santo, este autor classificou o método como “Ótimo”, resultados similares foram encontrados por Tanaka et al. (2016) em estudos com modelos simplificados para a estimativa da ETo no estado do Mato Grosso.

Quanto ao modelo de Radiação, o qual considera em sua formulação valores de radiação solar global e um fator de ponderação baseado na velocidade do vento e umidade relativa, este apresentou superestimativa da ETo ( $0,42 \text{ mm dia}^{-1}$ ), contudo, possibilitou resultados satisfatórios, sendo classificado como “Muito bom” e com boa concordância ( $d = 0,87$ ). Cavalcanti Junior et al. (2010) e Almeida et al. (2010) encontraram resultados satisfatórios aplicando o método em regiões nordestinas,

classificando-o como “Ótimo” para a utilização nas localidades estudadas.

Os modelos de Penman Mod., Hargreaves-Samani e Blaney-Criddle tiveram seu desempenho classificado como “Bom” e apresentaram superestimativa de 0,90; 0,62 e  $0,19 \text{ mm dia}^{-1}$ , respectivamente. Oliveira et al. (2001) encontraram resultados satisfatórios para os métodos de Penman Modificado e Hargreaves-Samani estudando algumas regiões de Goiás.

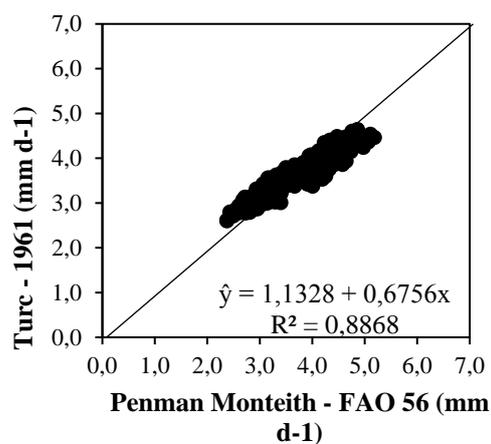
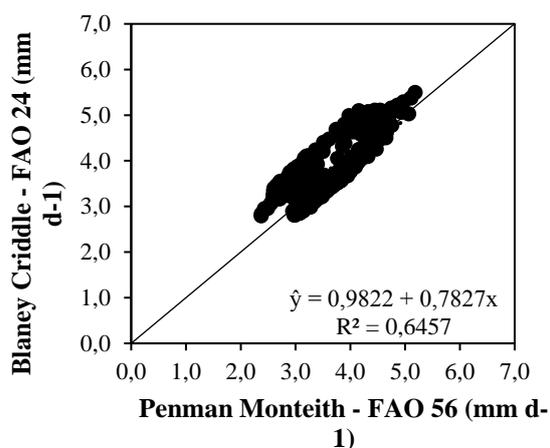
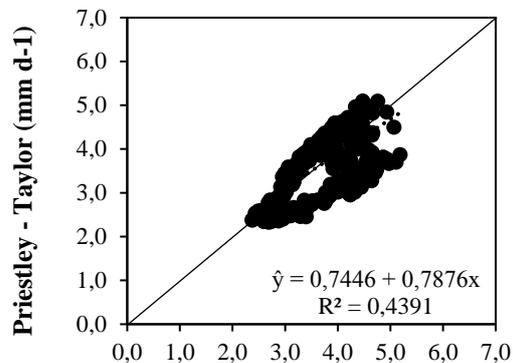
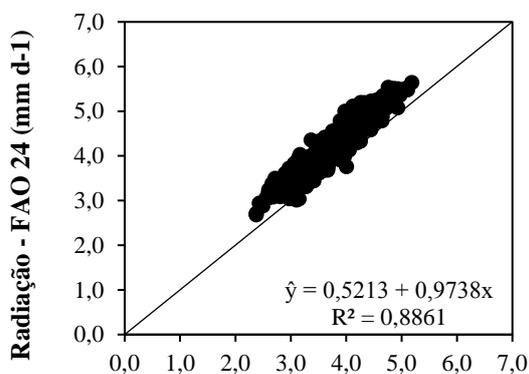
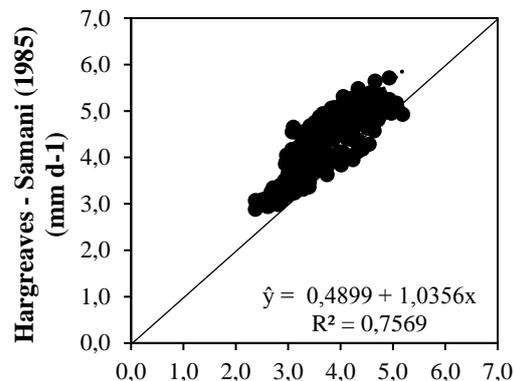
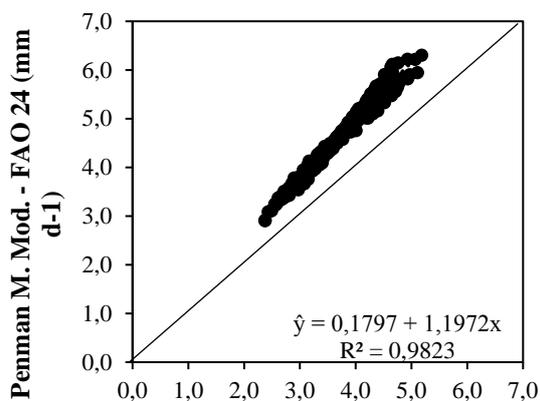
A equação de Priestley-Taylor apresentou o pior desempenho para a região de estudo, classificado como “Sofrível”. Este método é uma simplificação das equações de Penman Modificado e de Penman-Monteith/FAO-56 e apresenta a vantagem de se exigir menos dados, entretanto, o método não se ajustou para as condições da região de estudo. Nota-se que o método resultou em um valor de ETo média muito próximo ao determinado pelo método padrão, contudo, sua maior amplitude o classificou como de uso insatisfatório para a região de Rio Verde/GO. Cavalcante Junior et al. (2011), em estudos conduzidos na região semiárida nordestina, observaram comportamento similar ao deste estudo, classificando o método como “Mau” e “Mediano”, para os períodos seco e úmido, respectivamente.

Na Figura 1 encontram-se as correlações entre valores diários de evapotranspiração de

DESEMPENHO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O MUNICÍPIO DE RIO VERDE-GO

referência estimados pelos métodos estudados e os obtidos pelo método de Penman-

Monteith/FAO 56.



**Figura 1.** Equações e coeficientes de determinação obtidos entre os valores de ETo estimados pelos métodos de Penman Modificado, Radiação, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor e Turc, com os valores de ETo determinados pelo método de Penman-Monteith/FAO 56, para períodos diários.

Observa-se na Figura 1 que os modelos de Penman Modificado, Radiação, Hargreaves e Samani e Blaney-Criddle superestimaram os valores de ETo, quando comparados ao método padrão. Já os modelos de Turc e Priestley-Taylor apresentaram comportamento inverso, com pequena subestimativa. Dentre os métodos estudados, o de Priestley-Taylor apresentou uma maior dispersão dos pontos, não acompanhando a reta de valores 1:1.

Os métodos de Penman Modificado e Hargreaves e Samani apresentaram uma maior dispersão dos dados não acompanhando a linha de tendência, porém a dispersão seguiu a reta de valores 1:1. O modelo de Penman Modificado foi o que mais se distanciou, em termos quantitativos, do método padrão, percebe-se que este foi o que mais superestimou a ETo, com maior distanciamento da reta de valores 1:1. Ainda na Figura 1 observa-se a alta dispersão dos pontos do modelo Priestley-Taylor, evidenciando o baixo ajuste desse modelo de regressão para a região de estudo. Acredita-se que a amplitude térmica tenha interferido na baixa previsibilidade alcançada com o modelo de regressão, o qual é confirmado pelo reduzido valor do coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,43$ ). Resultados similares foram observados por Cunha e Bergamaschi (1994) e Sentelhas et al. (2000), o que corrobora os resultados encontrados nesse estudo e expõe a necessidade de ajuste local para a utilização do coeficiente de Priestley-Taylor.

Quanto a análise a partir do coeficiente de determinação, o método que apresentou o melhor ajuste foi o método Penman Modificado ( $r^2 = 0,98$ ), o qual utiliza os mesmos parâmetros do método padrão, seguido pelo de Turc ( $r^2 = 0,88$ ). Ao observar os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) entre os métodos, é possível perceber que ao comparar o desempenho dos modelos com base apenas nesse índice, pode-se incorrer em erros, principalmente quando a escolha for responsável, entre outras variáveis, para a determinação do balanço hídrico aplicado a culturas. Muitos trabalhos têm relacionado o

uso de modelos de estimativa baseados no coeficiente de determinação (VESCOVE; TURCO, 2005; MOURA et al., 2013), contudo, Barros et al. (2009), relatam que a adoção deste coeficiente como o único critério de avaliação de um método não é adequado para se classificar o mesmo.

## CONCLUSÃO

Para as condições climáticas do Município de Rio Verde os métodos de Turc e Radiação podem ser utilizados como substitutos do método padrão de Penman-Monteith/FAO56.

O método de Priestley-Taylor se destacou como o pior método usado para estimar a ETo, portanto sua adoção não é indicada para a localidade de estudo.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a coordenação do Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás (SIMEHGO) pela disponibilização dos dados meteorológicos utilizados neste estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 301p. Irrigation and Drainage, Paper 56.
- ALLEN, R. G. **REF-ET: reference evapotranspiration calculator**, Version 2.1. Idaho: Idaho University, 2000. 82p.
- ALMEIDA, B. M.; ARAÚJO, E. M.; CAVALCANTE JUNIOR, E. G.; OLIVEIRA, J. B. Comparação de métodos de estimativa da ETo na escala mensal em Fortaleza-CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.4, n.2, p.93-98, 2010.

- BARROS, V. R.; SOUZA, A. P.; FONSECA, D. C.; SILVA, L. B. D. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.4, n.2, p.198-203, 2009.
- BRAGANÇA, R.; REIS, E. F.; GARCIA, G. O.; PEZZOPANE, J. E. M. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência no período chuvoso para três localidades no estado do Espírito Santo. **Idesia**, Arica, v.28, n.2, p.21-29, 2010.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, L. F. C. **Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada**. Viçosa: Ed. UFV, 2012, 240p.
- CAVALCANTI JÚNIOR, E. G.; ALMEIDA, B. M.; OLIVEIRA, A. D.; SOBRINHO, J. E.; ARAÚJO, E. M.; VIEIRA, R. Y. Estimativa da evapotranspiração de referência para a cidade de Mossoró-RN. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.4, n.2, p.87-92, 2010.
- CAVALCANTE JÚNIOR, E. G.; OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. **Semina**, Londrina, v.32, n. suplemento, p.1699-1708, 2011.
- CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H. Coeficientes das equações de Makkink e Priestley-Taylor para a estimativa da evapotranspiração máxima da alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.2, n.1, p.33-36, 1994.
- IMB – Instituto Mauro Borges de Estatística e Estudos Socioeconômicos. **Produção Agrícola Municipal** (2015). Disponível em:<www.imb.go.gov.br>. Acesso em: 05 de março de 2017.
- MOURA, A. R. C.; MONTENEGRO, S. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; AZEVEDO, J. R. G.; ILVA, B. B.; OLIVEIRA, L. M. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no Estado de Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**. São Paulo, v.28, n.2, p.181-191, 2013.
- OLIVEIRA, L. F. C.; CARVALHO, D. F.; ROMÃO, P. A.; CORTÊS, F. C. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para algumas localidades no estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.31, n.2, p.121-126, 2001.
- PEREIRA, D. R.; YANAGE, S. N. M.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; SILVA, L. A. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2488-2493, 2009.
- SENTELHAS, T. C.; PEREIRA, A. R.; FOLEGATTI, M. V. Variação sazonal do parâmetro de Priestley-Taylor para a estimativa diária da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.8, n.1, p.49-53, 2000.
- TANAKA, A. A.; SOUZA, A. P.; KLAR, A. E.; SILVA, A. C.; GOMES, A. W. A. Evapotranspiração de referência estimada por modelos simplificados para o Estado do Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.2, p. 91-104, 2016.
- VESCOVE, H. V.; TURCO, J. E. P.

Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara/SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.713-721, 2005

WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v.90, n. C5, p. 8995-9005,1985.