



EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE PENMAN-MONTEITH COM DIFERENTES METODOLOGIAS PARA O CÁLCULO DA TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA DO AR

RONALDO LIMA MOREIRA BORGES, BENITO MOREIRA DE AZEVEDO, ANDRÉ RUFINO RUFINO CAMPÊLO, LUIS GONZAGA PINHEIRO NETO, THALES VINÍCIUS DE ARAÚJO VIANA

Universidade Federal do Ceará

RESUMO

Trata-se de um estudo da estimativa da evapotranspiração de referência com a equação de Penman-Monteith/FAO, fazendo-se uso de diferentes metodologias nos cálculos médios diários da temperatura do ar. Os dados utilizados compreenderam o período de janeiro a dezembro de 2002 e foram obtidos em uma estação meteorológica automatizada, localizada no município de Paraipaba, Estado do Ceará (latitude de 3°26' S, longitude de 39°08' W e altitude de 31m). Para o cálculo das médias diárias de temperatura utilizou-se a média aritmética de 24 leituras horárias, as equações propostas pela FAO, pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pelo Serviço de Meteorologia do Estado de São Paulo (SMESP). Os resultados mostram que podem ser utilizadas todas as equações de temperatura média diária do ar apresentadas, pois o coeficiente de determinação (R^2) apresentou os seguintes valores: método FAO (0,9892), método INMET (0,9886) e método SMESP (0,9888).

Palavras-chave: Penman, Monteith, ETo, saldo de radiação.

ABSTRACT

This is a study about the estimate of the evapotranspiration of reference through the Penman-Monteith/FAO equation, making use of different methodologies in the daily average calculations of the air temperature. The data utilized comprehends the period from January to December 2002, obtained in an automated meteorological station, located in the city of Paraipaba, State of Ceará (latitude 3°26' S, longitude 39°08' W and altitude of 31 m). For the calculation of the daily averages of temperature it was used the arithmetical average of 24 daily readings, the equations proposed by the National Institute of Meteorology - (INMET), by FAO and by the Service of Meteorology of the State of Sao Paulo – (SMESP). The results show that all the equations of daily average air temperature presented can be used, for the coefficient determination (R^2) presented the following values: INMET method (0,9886), FAO method (0,9892) and SMESP method (0,9888).

Key words: Penman, Monteith, ETo, net radiation.

INTRODUÇÃO

O manejo eficiente da irrigação resulta no uso racional do recurso água, visando a otimização da produtividade e minimizando o impacto ambiental. Desta maneira, os sistemas de irrigação devem ser dimensionados para satisfazer, no período de maior demanda, a evapotranspiração

das culturas (VERMEIREN, 1997). Esta quantidade de água requerida é estimada em função da evapotranspiração de referência (ETo) e do coeficiente da cultura (K_c), indicativo da necessidade de água, em cada estágio de desenvolvimento das plantas (DOORENBOS & PRUITT, 1986; ALLEN et al., 1998). Segundo

SEDIYAMA et al. (1996), o modelo de Penman-Monteith-FAO é atualmente o mais empregado para a estimativa da ETo.

Segundo PEREIRA et al. (1997), evapotranspiração (ET) é o termo utilizado para expressar a ocorrência simultânea dos processos de evaporação e transpiração, que são controlados pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água do solo às plantas.

Os principais fatores que afetam a evapotranspiração estão relacionados com as condições atmosféricas, a cultura, o manejo e as condições de campo. Dentre os parâmetros meteorológicos que afetam diretamente a evapotranspiração, podem-se destacar: a radiação solar, a temperatura e a umidade do ar e a velocidade do vento. O tipo de cultura, sua variedade e seu estágio de desenvolvimento, bem como as condições nas quais estão dispostas na superfície (rastejante, ereta, espaldeira, etc) também são fatores que influenciam na quantidade de água evapotranspirada por uma superfície vegetada (ALLEN et al., 1998).

SMITH (1991), citado por PEREIRA et al. (1997), define o termo evapotranspiração de referência (ETo) como sendo a quantidade de água utilizada por uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cobertura ao transporte de vapor d'água igual a 69 s m⁻¹. Essas condições representam a evapotranspiração de um gramado verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo, e sem falta de água, ou seja, sem restrição hídrica à cultura.

A temperatura do ar à superfície da terra apresenta um comportamento cíclico, passando por uma temperatura máxima e por uma mínima durante o dia. Pela própria definição, a temperatura média diária do ar deveria ser considerada como a média aritmética de todas as temperaturas observadas a intervalos regulares e curtos. No entanto, no Brasil, assim como em quase todos os países, esta "média" é estimada através de um parâmetro chamado de "temperatura compensada" cujo seu valor é calculado através da fórmula desenvolvida por A. SERRA, em 1938 (VAREJÃO-SILVA, 2000).

Este trabalho teve como objetivo avaliar e identificar os melhores métodos de determinar a temperatura para serem utilizadas na estimativa da

evapotranspiração de referência através da equação de Penman-Monteith-FAO.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido a partir de dados coletados na Estação Experimental do Centro Nacional de Pesquisa em Agroindústria Tropical, pertencente à EMBRAPA, localizado no Vale do Curu, município de Paraipaba, na região litorânea do Estado do Ceará, com coordenadas geográficas 3°26' de latitude Sul e 39°08' de longitude Oeste e altitude de 31m.

O clima da microrregião de Paraipaba no Vale do Curu, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw', caracterizando-se como clima tropical chuvoso, com temperatura média do mês mais frio maior ou igual a 18 °C e precipitação do mês mais seco inferior a 30mm, onde a época mais seca ocorre no inverno e o máximo de chuvas ocorre no outono (AGUIAR et al., 2003).

Os dados climáticos foram coletados na estação meteorológica automática (marca Campbell Scientific), durante o período de janeiro a dezembro de 2002. A variável meteorológica utilizada foi a temperatura do ar (T).

Os dados armazenados por um datalogger (Campbell Scientific, modelo 21X), programado para realizar as leituras dos sensores a cada minuto, com registros das médias ou totais a cada 60 minutos, ou seja, no final do dia obtinham-se 24 leituras para cada variável. No intervalo de até 10 dias, os dados eram coletados da estação e transferidos, com um módulo de armazenamento (marca Campbell Scientific, modelo SM 192), para um microcomputador fazendo-se uso do software PC208W, onde foram convertidos em planilha eletrônica MS Excel, versão 2002. Após a formatação destes dados, foi realizada uma análise de consistência dos valores obtidos, a fim de se identificar possíveis erros no registro dos mesmos, digitação, ausência registros ou valores nulos.

Para o cálculo da temperatura média mensal foram utilizadas as médias das temperaturas diárias obtidas por cada uma das metodologias: a primeira, considerada padrão, obtida através da média aritmética das 24 médias horárias da estação automatizada; a segunda, a equação proposta pelo INMET (equação 13); a terceira, a equação proposta pela FAO (equação 14); e a quarta, a equação proposta pelo Serviço Meteorológico do Estado de São Paulo (equação 15).

$$(01) T_2 = \frac{(2 \times t_{21h} + t_{9h} + t_{m\acute{a}x} + t_{m\acute{i}n})}{5}$$

Onde:

T₂ é a temperatura média do ar (°C);
t_{21h} e t_{9h} é a temperatura do ar observada às 21 e às 9 horas, respectivamente (°C);
t_{máx} é a temperatura máxima do ar do dia (°C);
t_{mín} é a temperatura mínima do ar do dia (°C);

$$(02) T_3 = \frac{t_{m\acute{a}x} + t_{m\acute{i}n}}{2}$$

Onde:

T₃ é a temperatura média do ar (°C);
t_{máx} é a temperatura máxima do ar do dia (°C);
t_{mín} é a temperatura mínima do ar do dia (°C);

$$(03) T_4 = \frac{(2 \times t_{21h} + t_{7h} + t_{14h})}{4}$$

Onde:

T₄ é a temperatura média do ar (°C);
t_{7h}, t_{14h} e t_{21h} é a temperatura do ar às 07, 14 e às 21 horas, respectivamente (°C).

Para estimar a evapotranspiração de referência diária utilizou-se o modelo de Penman-Monteith descrito em Allen et al. (1998):

$$(04) ET_oPM = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

Onde:

ET_{oPM} é a evapotranspiração de referência (mm.dia-1);
R_n é o saldo de radiação solar à superfície vegetada (MJ.m-2.dia-1);
G é a densidade de fluxo de calor sensível no solo (MJ.m-2.dia-1);
T é a temperatura média do ar (°C);
u₂ é a velocidade do vento medida a 2,0m de altura (m.s-1);
e_s é a pressão de vapor da água na saturação (kPa);
e_a é a pressão de vapor da água atual (kPa);
e_s - e_a é o déficit de pressão de vapor d'água (kPa);
Δ é a declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água (kPa.°C-1);
γ é a constante psicométrica (kPa.°C⁻¹).

O saldo de radiação solar foi calculado através da soma dos valores do saldo de radiação de ondas curtas com os valores do saldo de radiação de ondas longas, calculados pela equação (12).

$$(05) R_n = R_{ns} + R_{nl}$$

Na estimativa da evapotranspiração de referência, o valor de G foi considerado igual a zero.

Para calcular a pressão de saturação do vapor d'água em função da temperatura média do ar, foi utilizada a seguinte equação:

$$(06) e_s = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3}\right)$$

Onde:

e_s é a pressão de saturação do vapor de água (kPa);
T é a temperatura do ar (°C).

A equação 21 foi empregada no cálculo da pressão parcial de vapor d'água.

$$(07) e_a = e_s \cdot \frac{UR}{100}$$

Onde:

e_a é a pressão parcial do vapor d'água do ar (kPa);
UR é a umidade relativa do ar (%).

O valor da tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água foi calculado pela equação (22):

$$(08) \Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237,3)^2}$$

Alguns parâmetros foram considerados como constantes, embora apresentando uma pequena variação, devida à aceitação científica e à fraca variabilidade durante o período das estimativas. O valor da massa específica do ar atmosférico (□), por exemplo, considerada como 1,26 kg.m-3 e o calor latente de evaporação da água (□) considerado como 2,45 MJ.kg⁻¹, visto que □ é uma função muito fraca no intervalo de variação da temperatura das condições experimentais (AZEVEDO, 1999).

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, sendo cada tratamento constituído das diferentes fórmulas utilizadas para o

cálculo da radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar, respectivamente, e as repetições foram a evapotranspiração de referência estimadas com médias mensais da radiação solar, temperatura e umidade relativa. Totalizando na radiação solar 60 unidades experimentais, e 48 na temperatura e umidade relativa do ar.

Os dados foram analisados estatisticamente através do programa STAT, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, comparando as diferentes equações utilizadas para o cálculo da radiação solar, temperatura e umidade relativa. As análises foram realizadas com os cálculos de evapotranspiração calculados através de médias mensais. O experimento foi conduzido em estufa telada no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, em Areia. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com dez tratamentos e três repetições. Os tratamentos consistiram de dez variedades de fava (Boca-de-moça, BM; Branquinha, BR; Cara-de-velha, CV; Cara-larga, CL; Coquinho, CO; Galo-de-campina, GC; Malhadinha, MA; Manteiga, MN; Orelha-de-vó, OV; e Siara, SI), todas com hábito de crescimento indeterminado. Para o cultivo foram semeadas cinco sementes por vaso, deixando-se duas plantas após o desbaste. Durante a condução do experimento foram avaliadas características das fases vegetativas e de inflorescência. As informações dessas características foram produzidas segundo os descritores para *Phaseolus lunatus* (IPGRI, 2001).

Para os caracteres de cor, foi utilizada a tabela de padrão de cor de Munsell (Munsell Color Chart for Plant Tissues, 1952). Os dados de caracterização foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando-se o programa estatístico SAEG 8.0 (SAEG, 2000). Nas variáveis sem homogeneidade de variância aplicou-se o teste de Kruskal-Wallis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparando-se a estimativa da evapotranspiração de referência utilizando-se como padrão o cálculo da média da temperatura do ar, os valores registrados pela estação meteorológica automática, com as equações propostas pela INMET, FAO, e SMESP, foram obtidos os seguintes resultados:

O mês de maior demanda hídrica, no período estudado, foi o de outubro, quando foi

obtido um valor de 4,77mm.dia-1 para a ETo com a metodologia de Penman-Monteith, empregando-se os valores das variáveis meteorológicas registradas na estação automática, considerada como padrão. Esse mês também apresentou como o de maior demanda hídrica, observando-se os resultados obtidos, com as outras três metodologias estudadas.

Observando-se os resultados da comparação estatística, pela regressão linear, entre os valores de ETo obtidos por meio das diferentes metodologias de cálculo da temperatura do ar (média diária) com a metodologia padrão, verificou-se que os coeficientes de determinação (R^2) foram excelentes. Sendo 0,9886 para metodologia proposta pelo INMET, 0,9892 para metodologia proposta pela FAO e 0,9888 para a metodologia proposta pelo SMESP (Figuras 2, 3 e 4).

De acordo com a tabela 01, os cálculos de ETo empregando a metodologia de cálculo da temperatura média do ar proposta pela FAO apresentaram uma superestimativa, quando comparados com os valores obtidos com a metodologia padrão. Após o mês de junho, para a estação seca para o Estado do Ceará, todos os outros métodos também superestimaram os valores obtidos na estação meteorológica automática.

Na tabela 02 percebe-se que, quando consideradas apenas as médias mensais, os resultados da comparação estatística, pela regressão linear, mostraram coeficientes de determinação (R^2) ainda melhores. Sendo 0,9956 para metodologia proposta pelo INMET, 0,9969 para metodologia proposta pela FAO e 0,9955 para metodologia proposta pelo SMESP.

Na Tabela 03, encontram-se os valores de evapotranspiração de referência estimados através de diferentes maneiras para o cálculo da temperatura média do ar. Como pode ser observado não houve diferença estatística entre os valores médios anuais de ETo. Sendo que de acordo com análise estatística todas as equações usadas para cálculo da temperatura média do ar, podem ser utilizadas para o cálculo da evapotranspiração de referência para a região de Paraipaba.

CONCLUSÕES

Na estimativa da evapotranspiração de referência (diária ou mensal), com a metodologia de Penman-Monteith/FAO, no município de Paraipaba, Ceará, pode-se empregar no cálculo da temperatura

média do ar, qualquer uma das metodologias propostas.

Devido à maior disponibilidade dos dados de Tmax e Tmin nos diversos municípios do Estado

do Ceará, a estimativa de ETo pode ser realizada empregando-se valores de temperatura média do ar calculadas com a equação proposta pela FAO.

TABELA 01 - Evapotranspiração de referência estimada a partir de diferentes cálculos da temperatura média do ar. Paraipaba, 2002.

Mês	ETo (mm.dia ⁻¹)			
	ETO PADRÃO	ETO INMET	ETO FAO	ETO SMESP
Jan	2,65	2,73	2,77	2,69
Fev	3,80	3,86	3,92	3,83
Mar	3,07	3,02	3,08	3,00
Abr	2,57	2,53	2,57	2,51
Mai	2,90	2,88	2,94	2,86
Jun	2,71	2,73	2,79	2,71
Jul	3,19	3,23	3,30	3,21
Ago	4,02	4,25	4,29	4,21
Set	4,34	4,64	4,64	4,61
Out	4,77	5,01	5,08	4,98
Nov	4,16	4,37	4,42	4,40
Dez	4,13	4,32	4,37	4,29

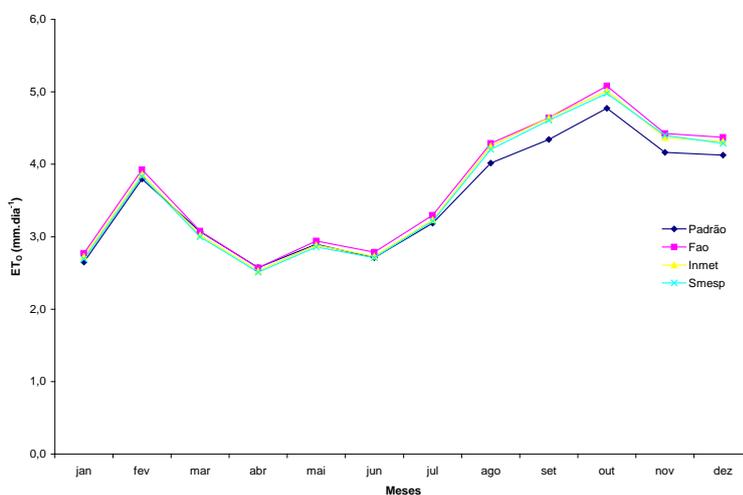


FIGURA 1 - Médias mensais dos valores de evapotranspiração de referência, estimados com a equação de Penman-Monteith e temperatura média do ar obtida em estação meteorológica automática e com as metodologias propostas pela INMET, FAO e SMESP, no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

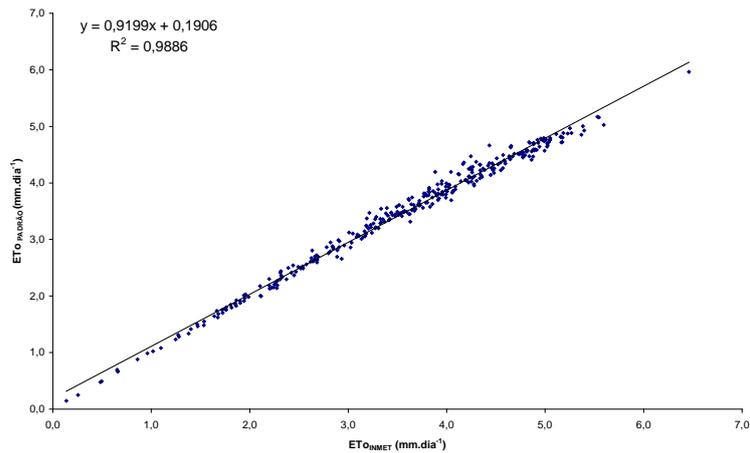


FIGURA 2 - Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e temperatura média do ar obtida com a estação meteorológica automática ($ET_{0\text{ PADRÃO}}$) e com temperatura média do ar obtida com a metodologia proposta pelo INMET ($ET_{0\text{ INMET}}$), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

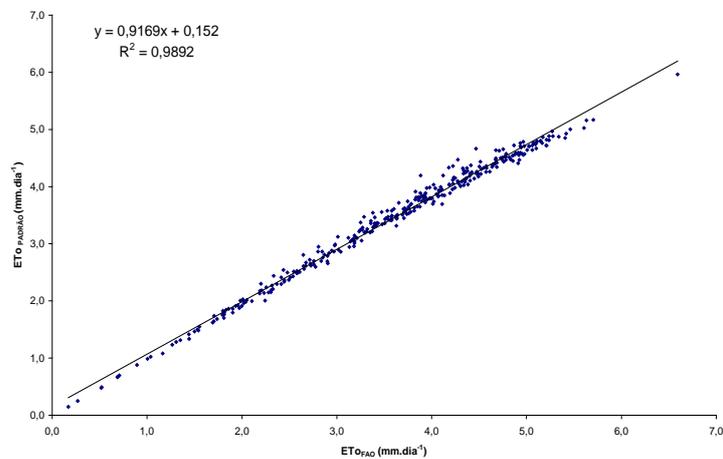


FIGURA 3 - Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e temperatura média do ar obtida com a estação meteorológica automática ($ET_{0\text{ PADRÃO}}$) e com temperatura média do ar obtida com a metodologia proposta pela FAO ($ET_{0\text{ FAO}}$), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

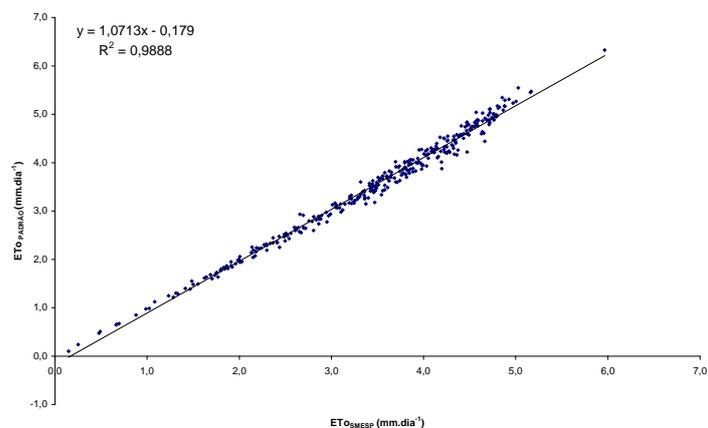


FIGURA 4 - Comparação entre os valores de evapotranspiração de referência estimados a partir da equação de Penman-Monteith e temperatura média do ar obtida com a estação meteorológica automática ($ET_{0\text{ PADRÃO}}$) e com temperatura média do ar obtida com a metodologia proposta pelo SMESP ($ET_{0\text{ SMESP}}$), no município de Paraipaba-CE, no ano de 2002.

TABELA 02 - Coeficientes de determinação (R^2) para as comparações estatísticas das médias mensais e diárias de valores de ETO obtidos por meio das diferentes metodologias de cálculo da temperatura média do ar.

Variáveis	R^2	
	Diária	Mensal
ETO _{PADRÃO} x ETO _{INMET}	0,9886	0,9956
ETO _{PADRÃO} x ETO _{FAO}	0,9882	0,9969
ETO _{PADRÃO} x ETO _{SMESP}	0,9888	0,9955

TABELA 03 – Médias anuais de Evapotranspiração de referência (ETO), obtidas por meio das diferentes metodologias de cálculo da temperatura média do ar.

Equações utilizando temperatura média do ar	Evapotranspiração (mm.dia ⁻¹)
ETO _{Padrão}	3,53 a
ETO _{INMET}	3,68 a
ETO _{FAO}	3,63 a
ETO _{SMESP}	3,61 a
D.M.S. (5%)	0,92

Médias seguidas por mesmas letras não diferem entre si ao nível de 5% pelo teste de tukey.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, M. J.; LIMA, G. B. de; BARRETO JÚNIOR, J. H. C.; BADU, F. O. Dados climatológicos: estação de Paraipaba, 2002. Fortaleza: EMBRAPA Agroindústria Tropical, 2003. 16p. (Embrapa Agroindústria Tropical Documentos, 73).
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 290p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- AZEVEDO, B. M. de. Evapotranspiração de referência obtida com a razão de Bowen, lisímetro de pesagem e equação de Penman-Monteith utilizando sistemas automáticos. 1999. 81p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Necessidades hídricas das culturas. Tradução H. R. Gheyi, J. E. C. Metri, F. A. Damasceno. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997. 204p., il. Título original: Crop water requirements. (Estudos FAO; Irrigação e Drenagem, 24).
- PEREIRA, A. R.; NOVA, N. A. V.; SEDYAMA, G. C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1997. 183p.
- SEDIYAMA, G. C.; MELO, J. S. P.; ALVES, A. R.; COELHO, D. T. Determinação dos parâmetros da distribuição de grama, em função das alturas mensais de precipitação dos dias chuvosos. Revista Ceres, Viçosa, v. 43, n. 274, p. 254-266, 1996.
- VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e climatologia. Brasília: INMET, 2000. 532p.
- VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A. Irrigação localizada. Tradução H. R. Gheyi et al. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997. 184p., il. Título original: Localized irrigation (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 36).