

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Arroz e Feijão
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 263

Evapotranspiração – Uma Revisão sobre os Métodos Empíricos

*Diego Simões Fernandes
Alexandre Bryan Heinemann
Rosidalva Lopes da Paz
André de Oliveira Amorim*

Embrapa Arroz e Feijão
Santo Antônio de Goiás, GO
2010

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Arroz e Feijão

Rod. GO 462, Km 12
Caixa Postal 179
75375-000 Santo Antônio de Goiás, GO
Fone: (0xx62) 3533 2110
Fax: (0xx62) 3533 2123
www.cnpaf.embrapa.br
sac@cnpaf.embrapa.br

Comitê de Publicações

Presidente: *Luís Fernando Stone*
Secretário-Executivo: *Luiz Roberto Rocha da Silva*
Membro: *Silvando Carlos da Silva*

Supervisor editorial: *Camilla Souza de Oliveira*
Revisão de texto: *Camilla Souza de Oliveira*
Normalização bibliográfica: *Ana Lúcia D. de Faria*
Tratamento de ilustrações: *Fabiano Severino*
Editoração eletrônica: *Fabiano Severino*

1ª edição

Versão online (2010)

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Arroz e Feijão

Evapotranspiração : uma revisão sobre os métodos empíricos / Diego Simões Fernandes ... [et al.]. - Santo Antônio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão, 2010.
44 p. - (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644 ; 263)

1. Evapotranspiração. I. Fernandes, Diego Simões. II. Embrapa Arroz e Feijão. III. Série.

CDD 551.572 (21. ed.)

© Embrapa 2010

Autores

Diego Simões Fernandes

Meteorologista, Mestre em Ciências Atmosféricas, Bolsista DTI-CNPq, Santo Antônio de Goiás, GO, diegosifer@cnpaf.embrapa.br

Alexandre Bryan Heinemann

Engenheiro agrônomo, Doutor em Irrigação e Drenagem, pesquisador da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO, alexbh@cnpaf.embrapa.br

Rosidalva Lopes da Paz

Bacharel em Física, Mestranda em Engenharia do Meio Ambiente, Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás/SIMEHGO – Secretaria de Estado de Ciências e Tecnologia/ SECTEC, Goiânia, GO, dalvapaz@yahoo.com.br

André de Oliveira Amorim

Geógrafo, Mestre em Engenharia Agrícola,
Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado
de Goiás/SIMEHGO – Secretaria de Estado de
Ciência e Tecnologia/SECTEC , Goiânia, GO,
amorim_go@yahoo.com.br

Apresentação

A estimativa correta da evapotranspiração serve de subsídios para quantificar a quantidade real de água a ser fornecida ao solo no monitoramento da irrigação. Desse modo, estimar a evapotranspiração de forma precisa contribui para o uso racional dos recursos hídricos naturais e reduz os custos de produção.

Existem várias metodologias desenvolvidas para estimativa da evapotranspiração, entretanto, poucas possuem aplicação prática para todas as condições climáticas, sendo necessário o ajuste dos coeficientes das equações.

Este documento tem como objetivo apresentar metodologias empíricas para obtenção dos valores de evapotranspiração de referência.

Os autores

Sumário

Introdução	9
Tipos de evapotranspiração	10
Evapotranspiração real	10
Evapotranspiração potencial	11
Evapotranspiração de referência	12
Evapotranspiração da cultura.....	12
Métodos empíricos de estimativa de evapotranspiração ...	13
Método de Penman-Monteith.....	15
Método de Thornthwaite.....	19
Método de Hargreaves.....	20
Método de Linacre	20
Método de Camargo.....	21
Método de Makkink.....	22
Método de Priestley & Taylor	23
Método de Benavides & Lopez.....	23
Método de Jensen-Hayse.....	23
Método de Blaney-Criddle	24
Método de Turc.....	26
Método de Hamon	26
Método de Kharrufa	26
Método de Radiação Solar.....	27
Método de Romanenko	27
Método de Penman	28
Método do Tanque “Classe A”	29

Método do Balanço de Energia.....	30
Aplicações de métodos para estimativa de evapotranspiração no Brasil	31
Referências	37

Evapotranspiração – Uma Revisão sobre os Métodos Empíricos

Diego Simões Fernandes

Alexandre Bryan Heinemann

Rosidalva Lopes da Paz

André de Oliveira Amorim

Introdução

De acordo com Berlato e Molion (1981), a evaporação da água é um fenômeno físico que propicia a mudança de estado da água na fase líquida para a fase gasosa. Esse fenômeno ocorre desde em superfícies de água livre, ou seja, mares, lagos, rios, açudes, até em superfícies úmidas, como plantas e solo. Quando essa mudança ocorre por meio das plantas recebe o nome de transpiração. Nos solos parcialmente vegetados, ocorrem tanto a evaporação quanto transpiração, assim, o processo é chamado de evapotranspiração.

Em períodos de seca, esse processo é um dos principais mecanismos de perda de água disponível, portanto, um fator gerador do próprio processo de seca. Segundo Brutsaert (1986), apesar do papel importante da evapotranspiração no balanço hídrico regional, ainda não existem dados disponíveis para a maioria das áreas agricultáveis.

A estimativa correta da evapotranspiração serve de subsídios para poder conhecer a quantidade real de água a ser fornecida ao solo no monitoramento da irrigação (SALGADO, 2001). Desse modo, determinar e quantificar a evapotranspiração de forma precisa aperfeiçoará o uso dos recursos hídricos naturais, economizando

energia elétrica e diminuindo, conseqüentemente, os custos de produção.

A evapotranspiração é um processo importante para o ciclo hidrológico, por meio do balanço hídrico, é possível estimar a recarga hídrica dos aquíferos (VALDIVIA, 2005). Existem várias metodologias desenvolvidas para estimativa da evapotranspiração, entretanto poucas possuem aplicação prática para todas as condições climáticas, sendo necessário muitas vezes, o ajuste de coeficientes das equações.

Este documento tem como objetivo apresentar algumas metodologias empíricas, em sua forma original, ou seja, sem ajustes de coeficientes para obtenção dos valores de evapotranspiração de referência, demonstrando as equações e cálculos necessários para obter o resultado final de cada método.

Tipos de evapotranspiração

A evapotranspiração é indicada nas mesmas unidades da precipitação pluvial (milímetros), utilizando-se a altura da lâmina de água. Por exemplo, um milímetro de evapotranspiração equivale transferir para a atmosfera um litro de água para cada metro quadrado da projeção horizontal da superfície. Existem na literatura quatro conceitos para evapotranspiração: real, potencial, de referência e da cultura. Abaixo são definidos esses quatro conceitos.

Evapotranspiração real

A evapotranspiração real é definida como a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais ou existentes de fatores atmosféricos e umidade do solo (MATZENAUER, 1992) (Figura 1). A evapotranspiração real é igual ou menor que a evapotranspiração potencial. De acordo com Tucci (2007), as variáveis obtidas no lisímetro, como escoamento, infiltração, armazenamento e percolação, permitem estabelecer a evapotranspiração real.

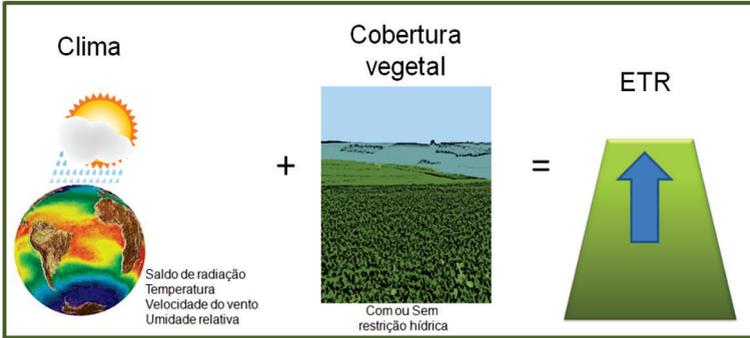


Figura 1. Evapotranspiração Real.

Fonte: adaptado de Allen et al. (1998).

Evapotranspiração potencial

O conceito de evapotranspiração potencial foi apresentado pela primeira vez no final dos anos 40 e início dos anos 50 pelo método de Penman. Basicamente, é definida como a quantidade de água transpirada, em um determinado espaço de tempo, a partir de uma vegetação rasteira e verde, cobrindo totalmente o solo, com altura uniforme e sem jamais sofrer limitações nas condições hídricas (TANNER; PELTON, 1960) (Figura 2). O principal problema com essa definição é que existem muitos tipos de culturas que se encaixam na descrição de vegetação rasteira e verde. Outro aspecto a considerar é que essa variável é calculada a partir de dados meteorológicos obtidos em condições não potenciais, ou seja, estando a umidade do solo bastante afastada da capacidade de campo.

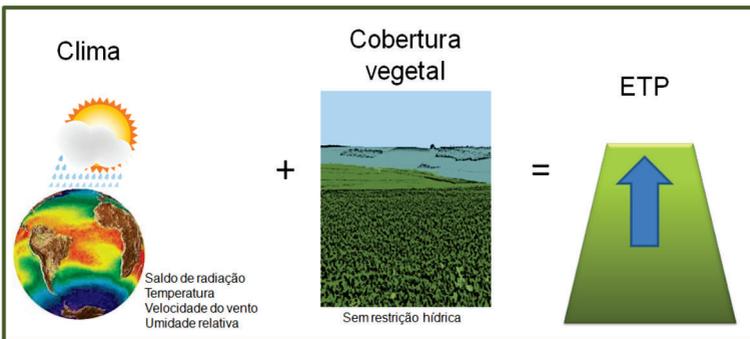


Figura 2. Evapotranspiração Potencial.

Fonte: adaptado de Allen et al. (1998).

Evapotranspiração de referência

O conceito de evapotranspiração de referência foi introduzido por pesquisadores e engenheiros de irrigação para evitar ambiguidades que existiam na definição da evapotranspiração potencial (FRIZZONE, 2004). A evapotranspiração de referência é definida como a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética com uma altura de 0,12 metros e um albedo de 0,23, condições parecidas com a evapotranspiração de uma extensa superfície de vegetação rasteira, com altura uniforme, crescimento ativo, condições hídricas suficientes, e com solo completamente coberto (SMITH, 1991) (Figura 3). Na definição de evapotranspiração de referência, a vegetação rasteira “grama” é definida especificamente como a cultura de referência, e essa cultura é considerada livre de estresse hídrico e de doenças. Na literatura, os termos evapotranspiração de referência e evapotranspiração da cultura, têm sido usados de forma intercambiável e ambos representam a mesma taxa de evapotranspiração considerando as condições descritas anteriormente referentes a vegetação rasteira “grama”.

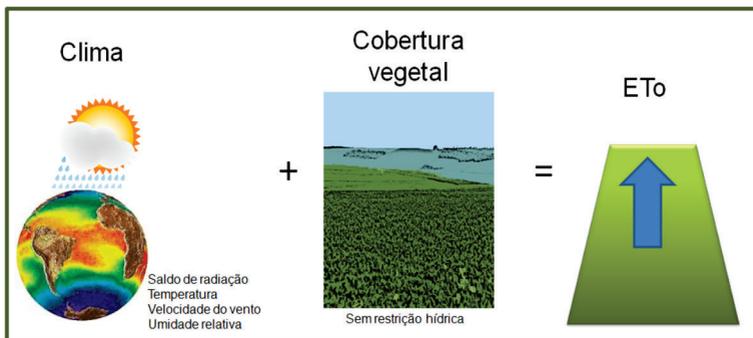


Figura 3. Evapotranspiração de Referência.

Fonte: adaptado de Allen et al. (1998).

Evapotranspiração da cultura

Conhecendo a evapotranspiração de referência, é possível estimar as necessidades hídricas de uma cultura, conhecida

como evapotranspiração da cultura (DOORENBOS; PRUITT, 1984). É definida como a transferência de vapor d'água para a atmosfera observada em uma cultura isenta de doenças e pragas, desenvolvendo-se em uma área de um hectare ou mais, sob ótimas condições de solo, incluindo umidade e fertilidade (Figura 4). Assim, a evapotranspiração da cultura é dependente das condições meteorológicas e do tipo de cultura.

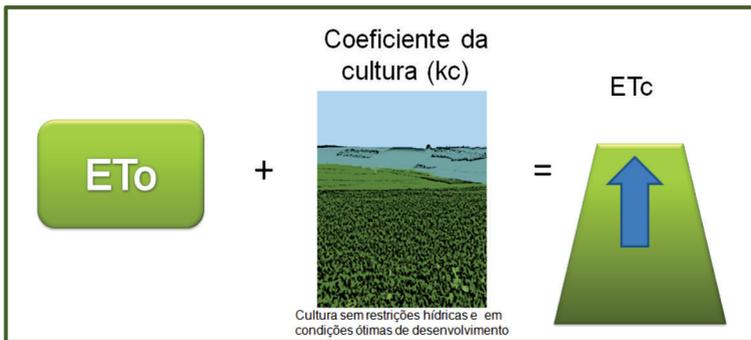


Figura 4. Evapotranspiração da Cultura.

Fonte: adaptado de Allen et al. (1998).

Métodos empíricos de estimativa de evapotranspiração

Para a avaliação da evapotranspiração existem diversos métodos e estes se dividem em três grandes categorias: métodos baseados em física teórica, métodos semi-empíricos e métodos empíricos. Neste documento, apenas a última categoria será considerada. Dentre os métodos empíricos, existem quatro classificações que são: métodos baseados unicamente em dados de temperatura média do ar, métodos baseados em combinações de temperatura do ar e radiação incidente, métodos baseados na combinação de temperatura do ar e pressão de vapor e métodos baseados em dados de evaporação. A Tabela 1 descreve os métodos que serão apresentados neste documento conjuntamente com as variáveis utilizadas, escala temporal recomendada e limitações detectadas em pesquisas.

Tabela 1. Resumo geral dos métodos empíricos de estimativa de evapotranspiração apresentados nesse documento.

<i>Método empírico</i>	<i>Variáveis necessárias</i>	<i>Escala temporal</i>	<i>Limitações do método</i>
Método de Penman-Monteith	T_{\min}' , T_{\max}' , UR_{\min}' , UR_{\max}' , RS , VV	D	Prós: método universal para obtenção dos valores de evapotranspiração de referência. Contras: utiliza muitas variáveis meteorológicas, impossibilitando seu cálculo.
Método de Thornthwaite	T_{\min}' , T_{\max}'	M	Prós: método muito utilizado para obtenção do balanço hídrico climático mensal. Contras: apesar de utilizar apenas dados de temperatura, seu cálculo é apenas para escala temporal mensal.
Método de Hargreaves	T_{\min}' , T_{\max}'	D	Prós: utiliza apenas dados de temperatura e pode ser usado para obtenção diária da evapotranspiração. Contras: não é recomendado para regiões com condições climáticas úmidas.
Método de Linacre	T_{\min}' , T_{\max}' , UR_{\min}' , UR_{\max}'	M	Prós: método simplificado do Penman, utilizando menos variáveis meteorológicas.
Método de Camargo	T_{\min}' , T_{\max}' , RS	D	Prós: metodologia fácil e que necessita apenas de dados de temperatura.
Método de Makkink	T_{\min}' , T_{\max}' , RS	D	Prós: utiliza apenas dados de temperatura e radiação solar, recomendado para condições climáticas úmidas. Contras: não obtém resultados satisfatórios para condições climáticas áridas.
Método de Priestley & Taylor	T_{\min}' , T_{\max}' , RS	D	Prós: baseado no método de Penman, utilizando menos variáveis no cálculo. Contras: em climas áridos, onde a advecção de temperatura é mais elevada, tende a subestimar os valores de evapotranspiração.
Método de Benavides & Lopes	T_{\min}' , T_{\max}' , UR_{\min}' , UR_{\max}'	D	Prós: metodologia fácil. Contras: superestima os valores de evapotranspiração observados pelo método de Penman-Monteith para regiões áridas.
Método de Jensen & Hayse	T_{\min}' , T_{\max}' , RS	D	Contras: desenvolvido para regiões áridas.
Método de Blaney & Criddle	T_{\min}' , T_{\max}'	D, M	Prós: método recomendado pela FAO quando o método de Penman-Monteith não pode ser calculado. Contras: utilizado apenas para regiões semi-áridas.
Método de Turc	T_{\min}' , T_{\max}' , RS	D	Prós: apresenta boa estimativa para regiões costeiras e úmidas.
Método de Hamon	T_{\min}' , T_{\max}'	M	Prós: utiliza apenas dados de temperatura, sendo o seu cálculo muito simples. Contras: tende a superestimar os valores de evapotranspiração para regiões úmidas.
Método de Kharrufa	T_{\min}' , T_{\max}'	D	Prós: método com cálculo simples

Continua...

Tabela 1. Continuação.

<i>Método empírico</i>	<i>Variáveis necessárias</i>	<i>Escala temporal</i>	<i>Limitações do método</i>
Método de Radiação Solar	T_{\min}^{\prime} , T_{\max}^{\prime} , UR_{\min}^{\prime} , UR_{\max}^{\prime} , RS, VV	D	Prós: adaptado para condições de umidade e foi inserido um coeficiente que pode ser utilizado para outras condições climáticas. Contras: assim como o método de Penman-Monteith, requer um número maior de variáveis meteorológicas, nem sempre disponível.
Método de Romanenko	T_{\min}^{\prime} , T_{\max}^{\prime} , UR_{\max}^{\prime} , UR_{\min}^{\prime}	M	Prós: método de cálculo simples e que requer apenas dados de temperatura e umidade. Contras: seus valores são obtidos mensalmente.
Método de Penman	T_{\min}^{\prime} , T_{\max}^{\prime} , RS, VV	D	Prós: método bastante utilizado, com boas estimativas de evapotranspiração quando comparado com o método padrão. Contras: mesmo problema que o método padrão, necessita de um número elevado de variáveis que nem sempre estão disponíveis.
Método do Tanque "Classe A"	UR_{\min}^{\prime} , UR_{\max}^{\prime} , VV, E	D	Contras: método baseado na evaporação obtida pelo tanque classe "A", dependendo do observador, pode conter erros de leitura.
Método do Balanço de Energia	T_{\min}^{\prime} , T_{\max}^{\prime} , UR_{\min}^{\prime} , UR_{\max}^{\prime} , RS	D	Prós: Basicamente é o mesmo balanço que o método de Penman-Monteith faz em sua metodologia, a diferença é que nesta metodologia não existe o termo aerodinâmico, ou seja, não são necessários dados de velocidade do vento.

Abreviaturas: T_{\min} – Temperatura mínima, T_{\max} – Temperatura máxima, UR_{\min} – Umidade Relativa mínima, UR_{\max} – Umidade Relativa máxima, RS – Radiação Solar, VV – Velocidade do Vento, E – Evaporação, D – Diário, M – Mensal.

Método de Penman-Monteith

Esse método foi divulgado pela FAO (*Food and Agriculture Organization*) das Nações Unidas como método padrão para obtenção dos valores diários de evapotranspiração de referência, conhecido universalmente como método de Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN et al., 1998). De acordo com Pereira et al. (2002) e Popova et al. (2006), o principal problema desse método é que ele requer medidas acuradas de muitas variáveis meteorológicas, como: temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento.

A equação 1 descreve como são obtidos os valores de evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith FAO-56.

$$ET_{O_{PM}} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{med} + 273,16} U_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

em que: R_n é o saldo de radiação ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$), G é a densidade do fluxo de calor no solo, que em nosso caso consideramos sempre sendo como G , D é a declinação da curva de saturação do vapor de água ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$) U_2 é a velocidade do vento (média diária) a 2 m acima da superfície do solo (m/s), T_{med} é a temperatura média do ar ($^\circ C$), e_s é a pressão de saturação do vapor (kPa), e_a é a pressão atual do vapor (kPa) e γ é o fator psicrométrico ($MJ \text{ } kg^{-1}$).

Os valores da velocidade do vento são transformados de 10 m para 2 m, que é a altura padrão para o cálculo pelo método Peman-Monteith, equação 2.

$$U_2 = U_z \frac{4,87}{\ln (67,8 * Z - 5,42)} \quad (2)$$

em que: U_z é a velocidade obtida na estação automática ou convencional e Z a altura em que foi coletado o dado.

A pressão de vapor de saturação para temperatura máxima do ar foi obtida pela equação 3. A mesma equação serve para obter a pressão de vapor de saturação para temperatura mínima do ar, substituindo o T_{max} por T_{min} .

$$e_s (T_{max}) = 0,6108 * e^{\left(\frac{17,27 * T_{max}}{T_{max} + 237,3} \right)} \quad (3)$$

em que: $e_s (T_{max})$ é a pressão de vapor de saturação para temperatura máxima do ar (kPa) e T_{max} é a temperatura máxima do ar ($^\circ C$).

A pressão de vapor de saturação da atmosfera, que é obtido pela soma dos valores de (e_s) é calculada pela soma dos valores de $e_s (T_{max})$ e $e_s (T_{min})$ dividindo-os por 2, equação 4.

$$e_s = \frac{e_s(T_{\max}) + e_s(T_{\min})}{2} \quad (4)$$

A pressão de vapor atual é calculada por meio da pressão de vapor de saturação, obtida pela temperatura média do ar, mesmo processo da equação 3. A pressão de vapor atual é obtida pela equação 5.

$$e_a = e_s(T_{\text{med}}) \frac{UR_{\text{med}}}{100} \quad (5)$$

em que: e_a é a pressão de vapor atual (kPa), $e_s(T_{\text{med}})$ é a pressão de vapor de saturação da temperatura média (kPa) e UR_{med} é a umidade relativa média do ar (%).

Com os valores de pressão de vapor de saturação (e_s) e pressão atual de vapor (e_a) calculados, pode-se calcular o déficit da pressão de vapor (DVP), equação 6.

$$DVP = e_s - e_a \quad (6)$$

A inclinação da curva de pressão de vapor à saturação, denominado delta (Δ), pode ser calculada pela equação 7. Para esse cálculo, utiliza-se a temperatura média diária (T_{med}) e a pressão de vapor de saturação (e_s).

$$\Delta = \frac{4098 * e_s}{(T_{\text{med}} + 237,3)^2} \quad (7)$$

O cálculo da pressão atmosférica estimada é descrito na equação 8.

$$P_a = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 * z}{293} \right)^{5,26} \quad (8)$$

em que: P_a é a pressão atmosférica estimada, z é a altitude da estação de coleta dos dados meteorológicos.

Depois de obtido o valor de pressão atmosférica, pode-se calcular a constante psicrométrica (Y), obtida aqui pela equação 9.

$$Y = 0,664742 * 10^{-3} * P_a \quad (9)$$

A equação 10 ilustra a obtenção dos valores da radiação solar extra-terrestre, ou seja, a radiação solar no topo da atmosfera, denominada R_a . Para a obtenção dessa variável, outras variáveis auxiliares, como: a distância relativa sol-Terra (d_r , eq. 11), inclinação solar (δ , eq. 12) e ângulo solar (ω_s , eq. 13) são determinadas.

$$R_a = 37,6 * d_r * (\omega_s * \sin\varphi * \sin\sigma + \cos\varphi * \cos\sigma * \sin\omega_s) \quad (10)$$

$$d_r = 1 + 0,033 * \cos(0,0172 * j) \quad (11)$$

$$\delta = 0,409 * \sin((0,0172 * j) - 1,39) \quad (12)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\text{lat} * \pi / 180) * \tan(\delta)) \quad (13)$$

em que: j é o dia Juliano e lat é a latitude da estação meteorológica.

A radiação de onda longa para dias claros (R_{so}) utiliza a altitude (z) e a radiação solar extraterrestre (R_a), obtida pela equação 10. O cálculo dessa variável está demonstrado na equação 14.

$$R_{so} = \left[0,75 + 2 * \frac{z}{100000} \right] * R_a \quad (14)$$

Com os dados de radiação solar global (R_s) obtido nas estações meteorológicas, podem-se calcular a radiação de onda curta (R_{NC}) e a radiação de onda longa (R_{NL}), equações 15 e 16, respectivamente.

$$R_{NC} = 0,77 * R_s \quad (15)$$

$$R_{NL} = \sigma * \left[\frac{(T_{\max} + 273,16)^4 + (T_{\min} + 273,16)^4}{2} \right] * (0,34 - 0,14 * \sqrt{e_a}) * \left(1,35 * \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (16)$$

em que: R_s é a radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), R_{so} é a radiação de onda longa em um dia claro ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), σ é a constante de Stefan-Boltzmann e e_a é a pressão de vapor atual (kPa).

Depois de feito esses cálculos se obtém a radiação líquida, que é a subtração das radiações de onda curta e longa demonstrada na equação 17.

$$R_n = R_{NC} - R_{NL} \quad (17)$$

Feito o cálculo de todas essas variáveis, substitui-se os valores na equação 1, e assim se obtém a evapotranspiração de referência diária pelo método de Peman-Monteith FAO-56.

Método de Thornthwaite

O método de Thornthwaite (1948) foi apresentado pela primeira vez em 1944, onde envolvia as variáveis: comprimento do dia, temperatura média diária e umidade relativa média do ar. Posteriormente, com modificações da equação, a variável umidade do ar foi suprimida. Segundo Conceição (2003), o método foi desenvolvido para regiões áridas e semi-áridas. No entanto, Camargo e Camargo (2000) ressaltam que em condições de aridez, o método tende a subestimar os valores da evapotranspiração potencial, enquanto que em condições super-úmidas, o método tende a superestimar os valores da evapotranspiração potencial. Em geral, o método tem boa estimativa para o clima úmido, independente da latitude e altitude, quando comparado com o método de Penman.

O método de Thornthwaite é baseado em um índice de eficiência de temperatura anual (I) (eq. 18), que é definido pela soma de 12 valores mensais do índice de calor (i) (eq. 19).

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad (18)$$

$$i = \left(\frac{T_{med}}{5} \right)^{1,514} \quad (19)$$

em que: I é o índice de calor anual, i é o índice de calor mensal e T_{med} é a temperatura média mensal.

Para obter os valores de evapotranspiração potencial, ainda é necessário obter o valor do coeficiente "a", o qual é baseado no índice de calor anual (eq. 20).

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 0,01791 \times I + 0,49239 \quad (20)$$

A evapotranspiração potencial em milímetros é obtida pela equação 21.

$$ETP_p = 16 \times \left(\frac{10 \times T_{med}}{I} \right)^a \quad (21)$$

A equação 21 obtém valores de evapotranspiração para uma condição padrão, ou seja, com 12 horas de fotoperíodo e mês com 30 dias. A evapotranspiração mensal corrigida é obtida pela equação 22.

$$ETo_T = ETP_p \frac{N}{12} \frac{ND}{30} \quad (22)$$

em que: N é o fotoperíodo do 15º dia do mês e ND é o número de dias do mês.

O método de Thornthwaite é aconselhável apenas para períodos mensais.

Método de Hargreaves

O cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves é menos complexo do que o método de Penman-Monteith. Este método é utilizado quando não existem dados de radiação global solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Neste caso, podem-se obter os valores de evapotranspiração de referência, em milímetros diário, pelo método de Hargreaves (HARGREAVES, 1974), descrito pela equação 23.

$$ETo_{HG} = 0,408 \times 0,0023 (T_{med} + 17,8) * (T_{max} - T_{min})^{0,5} * R_a \quad (23)$$

em que: T_{med} é a temperatura média do ar, T_{max} é a temperatura máxima do ar, T_{min} é a temperatura mínima do ar e R_a é a radiação solar extra-terrestre demonstrada anteriormente na equação 10.

Método de Linacre

O método de Linacre foi testado originalmente para as condições climáticas da Austrália. Este método é simples e foi baseado em uma simplificação da metodologia de Penman-Monteith. A estimativa da evapotranspiração de referência é baseada em dados de temperatura, umidade relativa do ar e em função da latitude e longitude (LINACRE, 1977). Os valores de evapotranspiração de referência pelo método de

Linacre são obtidos pela equação 24 pressupondo um albedo de 0,25 (LINACRE, 1977).

$$ET_{O_{Lin}} = \frac{500 \left(\frac{T_{med} + 0,006 \times h}{100 - \varphi} \right) + 15 (T_{med} - T_{po})}{(80 - T_{med})} \quad (24)$$

em que: h é a altitude local (metros), φ é a altitude em módulo (graus) e T_{po} é a temperatura média do ponto de orvalho ($^{\circ}C$).

A temperatura do ponto de orvalho pode ser obtida pela equação 25.

$$T_{po} = \frac{237,3 \times \text{Log}(e_a) - 156,8}{8,16 - \text{Log}(e_a)} \quad (25)$$

em que: e_a é a pressão de vapor atual, descrita anteriormente pela equação 5.

Segundo Linacre (1977), as diferenças observadas entre o tanque evaporimétrico e a estimativa feita pelo método, foram da ordem de $0,3 \text{ mm.dia}^{-1}$ para períodos anuais, e de até $2,3 \text{ mm.dia}^{-1}$ para períodos mensais.

Método de Camargo

Na década de 70, Camargo (1971), baseado em resultados obtidos pelo método de Thornthwaite, propôs um novo método, mais simples e com eficiência semelhante ao de Thornthwaite. Essa metodologia é baseada apenas em dados de temperatura média do ar e radiação solar extra-terrestre, sendo esta última variável calculada pela equação 5, a qual requer somente a latitude local. O método de Camargo é obtido pela equação 26.

$$ET_{O_{Cam}} = K \times R_a \times T_{med} \times ND \quad (26)$$

em que: K é o fator de ajuste que varia com a temperatura média anual ($^{\circ}C$) do local, conforme os limites estabelecidos na Tabela 2.

Tabela 2. Valor de K em relação à temperatura média anual.

<i>T_a</i> (°C)	Valor de K
< 23,5	0,01
23,6 a 24,5	0,0105
24,6 a 25,5	0,011
25,6 a 26,5	0,0115
26,6 a 27,5	0,012
> 27,5	0,013

Fonte: Camargo e Camargo (2000).

Método de Makkink

Este método é bastante popular no oeste europeu. Desenvolvido por Makkink (1957) na Holanda, o método é baseado no método de Penman e utiliza dados de radiação solar global. O método de Makkink é obtido pela equação 27.

$$ET_{O_{Mak}} = (0,61 \times R_s \times W) - 0,12 \quad (27)$$

em que R_s é a radiação solar global ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) e W é o fator de ponderação que representa a fração de R_s , que é utilizada na evapotranspiração, para diferentes valores de temperatura e altitude.

O fator W é obtido pela equação 28.

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \quad (28)$$

em que Δ é a inclinação da curva de pressão de saturação e vapor e temperatura do ar, obtida anteriormente pela equação 7, γ é a constante psicrométrica, obtida anteriormente pela equação 9.

A radiação solar global deve ser convertida para milímetros e pode ser obtida da relação descrita na equação 29.

$$R_{S(mm)} = \frac{R_s}{\lambda} \quad (29)$$

em que: λ é o calor latente de vaporização ($MJ.mm^{-1}$)

O método de Makkink descreve uma relação linear entre a evapotranspiração potencial e o parâmetro W e a radiação solar global. Os coeficientes foram obtidos para Wagening, Holanda, e podem variar de região para

região. O fator W depende da temperatura de bulbo úmido (T_u), quando esta temperatura não está disponível pode ser substituída pela T_{med} . Considerando que $T_{med} > T_u$, o fator W será levemente maior, provocando uma superestimativa da evapotranspiração. Segundo Rosemberg et al. (1983), o método de Makkink apresenta bons resultados em climas úmidos, no entanto, em regiões áridas não são observados resultados satisfatórios.

Método de Priestley & Taylor

O método de Priestley e Taylor (1972) é uma aproximação do método de Penman. Os autores simplificaram a equação de Penman permanecendo apenas o saldo de radiação corrigido por coeficiente empírico, chamado de parâmetro de Priestley & Taylor. Esse parâmetro incorpora a energia adicional ao processo de evapotranspiração decorrente do termo aerodinâmico. Os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Priestley & Taylor são obtidos pela equação 30.

$$ET_{O_{PT}} = \frac{\alpha \times W (R_n - G)}{\lambda} \quad (30)$$

em que: α é o parâmetro de Priestley & Taylor, W é o fator de ponderação, obtido pela equação 28, R_n é saldo de radiação, obtido pela equação 17, G é a densidade do fluxo de calor no solo, e λ é o calor latente ($2,45 \text{ MJ.kg}^{-1}$).

Método de Benavides & Lopez

Este método foi desenvolvido por Garcia Benavides e Lopez Diaz (1970) e baseia-se em dados de temperatura média e umidade relativa do ar, seus valores são estimados pela equação 31.

$$ET_{O_{BL}} = 1,21 \times 10 \left(\frac{7,45T_{med}}{234,7 + T_{med}} \right) (1 - 0,01UR_{med}) + 0,21 T_{med} - 2,30 \quad (31)$$

Método de Jensen-Hayse

Este método foi desenvolvido por Jensen e Hayse (1963) para regiões áridas e semi-áridas. Consiste em estimar a evapotranspiração de referência apenas com dados de temperatura do ar e radiação solar (PEREIRA et al., 1997). A equação 32 descreve como são obtidos os valores de evapotranspiração por este método.

$$ET_{O_{JH}} = R_s (0,025 \times T_{med} + 0,078) \quad (32)$$

em que R_s é a radiação solar global convertida em unidades de água evaporada (milímetros) obtida pela equação 29.

Método de Blaney-Criddle

O método de Blaney e Criddle (1950) foi desenvolvido para a região oeste dos Estados Unidos, uma região semi-árida dos estados de Novo México e Texas. De acordo com Doorenbos e Pruitt (1984), com a inserção de um fator de correção, o método pode ser aplicado para várias condições climáticas. Assim, ficou conhecido como método Blaney-Criddle FAO-24. O fator de correção é estimado a partir das variáveis: umidade, velocidade do vento e insolação (SMITH et al., 1996). A equação 33 é o método de Blaney-Criddle modificado e apresentado no boletim FAO-24.

$$ET_{O_{BC}} = cp (0,46 T_{med} + 8,13) \quad (33)$$

em que: c é o coeficiente de ajuste, representado pela inclinação da reta dos nomogramas, p é a porcentagem do total de fotoperíodo médio mensal ($^{\circ}C$) sobre o total de fotoperíodo anual, obtido na Tabela 3.

Tabela 3. Fator p de Blaney-Criddle, em função da latitude e época do ano.

<i>Mês</i>	<i>Latitude Sul</i>		
	<i>20°</i>	<i>21,23°</i>	<i>25°</i>
Janeiro	0,30	0,302	0,31
Fevereiro	0,29	0,290	0,29
Março	0,28	0,280	0,28
Abril	0,26	0,260	0,26
Maio	0,25	0,250	0,25
Junho	0,25	0,248	0,24
Julho	0,25	0,248	0,24
Agosto	0,26	0,260	0,26
Setembro	0,27	0,270	0,27
Outubro	0,28	0,282	0,29
Novembro	0,29	0,292	0,30
Dezembro	0,30	0,302	0,31

Fonte: Doorenbos & Pruitt (1984).

Como a utilização de nomogramas e interpolações dificulta o processo de obtenção dos valores de evapotranspiração de referência, Frevert et al. (1983) propuseram equações para contornar esses problemas e tornar o cálculo mais automatizado. A equação 34 descreve as modificações sugeridas à equação do método Blaney-Criddle FAO-24.

$$ET_{O_{BC}} = "a + b" \times p (0,46 T_{med} + 8,13) \quad (34)$$

As equações 35 e 36 ilustram como obter os valores dos coeficientes a e b, respectivamente.

$$a = 0,0043 UR_{min} - \frac{n}{N} - 1,41 \quad (35)$$

$$b = a_0 + a_1 UR_{min} + a_2 \frac{n}{N} + a_3 U_2 + a_4 UR_{min} \left(\frac{n}{N} \right) + a_5 UR_{min} U_2 \quad (36)$$

em que: UR_{min} é a umidade relativa mínima mensal, n/N é a razão da insolação média mensal, U_2 é a velocidade média do vento a 2 metros de altura (m.s-1), $a_0 = 0,81917$, $a_1 = -0,0040922$, $a_2 = 1,0705$, $a_3 = 0,065649$, $a_4 = -0,0059684$ e $a_5 = -0,0005967$.

Segundo Doorenbos e Pruitt (1984), esse método não é recomendado para regiões em que a temperatura do ar se mantenha estável, ou seja, regiões equatoriais, regiões com altitudes elevadas, devido à temperatura média diária ser baixa até mesmo quando os níveis de radiação solar diária são altos, e para regiões com alta variabilidade climática nas horas de brilho solar, como: climas de monção, climas de latitudes médias durante a primavera e outono.

O método de Blaney-Criddle FAO-24 pode ser utilizado para estimar a evapotranspiração em escalas de tempo menor que a mensal, porém, seus valores são questionáveis tendo em vista que o método foi desenvolvido baseado em dados médios mensais. Depois das modificações sugeridas por Frevert et al. (1983), o método, que era baseado apenas em dados de temperatura do ar, passou a exigir dados observacionais de umidade relativa, velocidade do vento e insolação.

Método de Turc

Assim como o método de Makkink, este método também foi desenvolvido para o oeste europeu, onde a umidade do ar é maior que 50% (KASHYAP; PANDA, 2001). A equação 37 descreve como obter os valores de evapotranspiração de referência pelo método de Turc (1961).

$$ET_{O_{TU}} = a_t \times 0,013 \left(\frac{T_{med}}{T_{med} + 15} \right) \times \left(\frac{R_s / 0,0238846 + 50}{\lambda} \right) \quad (37)$$

em que: a_t é o fator da umidade relativa, se a umidade relativa do ar for maior ou igual a 50%, $a_t = 1,0$, senão pode ser calculado pela equação 38, R_s é a radiação solar global ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) e λ é o calor latente de vaporização ($MJ.mm^{-1}$).

$$a_t = 1 + \frac{50 - UR}{70} \quad (38)$$

Método de Hamon

Este método foi desenvolvido na década de 60 por Hamon (1961), o autor evidenciou que o método de Thornthwaite superestimava a evapotranspiração no verão e subestimava no inverno. Esse método inclui o efeito da insolação, incorporando a duração do dia, baseado na latitude, e utiliza dados de temperatura do ar para obter a pressão de vapor de saturação. A equação 39 descreve como obter os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Hamon.

$$ET_{O_{HA}} = 0,55 \left(\frac{N}{12} \right)^2 \times Pt \quad (39)$$

em que: Pt é a densidade de vapor d'água saturada obtida pela equação 40.

$$Pt = \frac{4,95 \exp^{(0,062T_{med})}}{100} \quad (40)$$

Método de Kharrufa

A equação deste método, descrita pela equação 41, foi desenvolvida por Kharrufa (1985) e baseia-se na correlação entre a razão da evapotranspiração e porcentagem do total do fotoperíodo e a temperatura do ar.

$$ET_{O_{KH}} = 0,34 \times p \times T_{med}^{1,3} \quad (41)$$

Método de Radiação Solar

Este método foi apresentado por Doorenbos e Pruitt (1984) e utiliza a radiação solar para estimar os valores de evapotranspiração. De acordo com Jensen et al. (1990), o método é uma adaptação do método de Makkink (1957), que havia sido desenvolvido para as condições de umidade da Holanda. Os autores ainda recomendam que este método seja utilizado, ao invés do método de Penman, quando medidas de velocidade do vento e umidade relativa não estiverem disponíveis. A equação 42 descreve como estimar os valores de evapotranspiração.

$$ET_{O_{RS}} = a + b \times (W \times R_s) \quad (42)$$

em que: a e b são coeficientes por Frevert et al. (1983) (equações 35 e 36, respectivamente), W é o fator de ponderação descrito pela equação 28.

A radiação solar, muitas vezes, não é medida diretamente em todas as estações meteorológicas, no entanto, pode ser obtida a partir de medidas de insolação. Outro meio bastante usual de obter os valores de radiação solar são métodos calibrados de estimativa de radiação solar, sendo esta, uma boa alternativa para obter os valores dessa variável para utilização no método de radiação. Segundo Doorenbos e Pruitt (1984), um método bastante simples para estimar a radiação solar é a partir da radiação extraterrestre, expressa na equação 43.

$$R_s = \left(0,25 + 0,5 \frac{n}{N}\right) R_a \quad (43)$$

Método de Romanenko

O método de Romanenko (1961) é muito simples, sendo derivado de uma equação de evaporação com base na relação da temperatura média e umidade relativa do ar, equação 44.

$$ET_{O_{RO}} = 0,0018 (25 + T_{med})^2 (100 - Rh) \quad (44)$$

em que: R_h é umidade relativa média mensal, obtida na equação 45, baseada na razão da pressão de vapor de saturação da temperatura do ponto de orvalho e pressão de vapor de saturação da temperatura média do ar. A expressão para obter os valores da pressão de vapor de saturação está expressa na equação 46.

$$R_h = \frac{e^o(T_{po})}{e^o(T_{med})} \quad (45)$$

$$e^o(V) = 33,8679[(0,00738V + 0,8072)^8 - 0,000019|1,8V + 48| + 0,001316] \quad (46)$$

em que: V é substituído tanto pela temperatura do ponto de orvalho como pela temperatura média do ar.

Método de Penman

O método original de Penman (1948) é um dos mais utilizados e sua equação é derivada, assumindo a proporcionalidade entre a evaporação da água e a evapotranspiração da grama sub-irrigada. A estimativa da evapotranspiração de referência, utilizando o método de Penman, é obtida pela equação 47.

$$ET_{OPE} = \frac{W \times R_n}{\lambda} + (1-W)E_a \quad (47)$$

em que: λ é o calor latente de evaporação ($MJ.kg^{-1}$), W é o fator de ponderação, obtida anteriormente na equação (28), R_n é o saldo da radiação ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) e E_a é o poder de evaporação do ar ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$), obtido na equação 48.

$$E_a = f(U)DPV \quad (48)$$

em que: DPV é o déficit do vapor de saturação (kPa), obtido na equação 6, e $f(U_2)$ é obtido pela equação 49.

$$f(U) = m(a + bU_2) \quad (49)$$

Segundo Penman (1948), $m = 6,43$ ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$ kPa), $a = 1$ sendo este um valor adimensional e $b = 0,526$ ($s.m^{-1}$).

Método do Tanque “Classe A”

O método do tanque “Classe A” foi desenvolvido pelo Serviço Meteorológico Norte-Americano e é de uso generalizado, inclusive no Brasil (PEREIRA et al., 1997). A equação 50 descreve como são obtidos os valores de evapotranspiração de referência estimados por esta metodologia.

$$ET_{O_{TCA}} = K_p E_v \quad (50)$$

em que: K_p é o coeficiente de conversão da evapotranspiração do tanque “Classe A” em evapotranspiração de referência, que varia em função da velocidade do vento, da área de exposição vegetal relativa ao tanque e da umidade relativa do ar, E_v é a lâmina da evaporação do tanque “Classe A” (mm.d^{-1}).

Os valores de K_p , baseados no manual 24 da FAO, consideram um tanque instalado sobre uma área cultivada com grama e estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Valores dos coeficientes do tanque “Classe A”.

<i>Mês</i>	<i>Média de U_2</i> <i>($m.s^{-1}$)</i>	<i>Média da UR</i> <i>(%)</i>	<i>K_p Tabelado</i> <i>FAO</i>
Janeiro	4,24	70,61	0,75
Fevereiro	3,77	72,18	0,75
Março	3,08	77,46	0,75
Abril	2,19	79,86	0,75
Maio	2,53	76,91	0,75
Junho	3,01	72,60	0,75
Julho	3,39	66,93	0,70
Agosto	4,36	61,02	0,70
Setembro	5,25	61,27	0,60
Outubro	5,55	61,79	0,60
Novembro	5,40	63,92	0,60
Dezembro	5,15	65,97	0,60

Fonte: Doorenbos e Pruitt (1984).

O coeficiente K_p , segundo manual FAO-56, pode ser obtido pela equação 51 (ALLEN et al., 1998).

$$K_p = 0,108 - 0,0286 U_2 + 0,0422 \ln(B) + 0,1434 \ln(U_{r_{med}}) - 0,000631 [\ln(B)]^2 \ln(U_{r_{med}}) \quad (51)$$

em que: B é a bordadura da área (m), U_2 é a velocidade do vento ($m.s^{-1}$) e $U_{r_{med}}$ é a umidade relativa média (%).

Método do balanço de energia

Este método representa a interação dos diversos tipos de energia com a superfície em forma de balanço. Em condições normais, o suprimento principal de energia para a superfície é dado pela radiação solar. De modo geral, é o mesmo balanço de energia que é utilizado no método de Penman-Monteith, a diferença é que no método do balanço de energia não existe o termo aerodinâmico.

A radiação incidente, também conhecida como radiação de ondas curtas, é baseada no comprimento de onda dos raios solares. Parte desta radiação é refletida pela superfície de volta à atmosfera, conforme o poder refletor, em que quanto maior o poder refletor menor será o balanço de ondas curtas (PEREIRA et al., 1997). Portanto, o balanço da radiação de ondas curtas é obtido pela equação 52.

$$R_{ns} = R_s (1 - r) \quad (52)$$

em que: R_s é a radiação solar global ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$), obtida pela equação 43, r é o poder refletor.

A radiação que a superfície emite para a atmosfera é conhecida como radiação de onda longa, essa emissão é em função da temperatura do ar. O balanço da radiação de ondas longas é obtido pela equação 53.

$$R_{nl} = - [0,56 - 0,25(e_a)^{0,5}] \sigma T_{med}^4 [0,1 + 0,9 \frac{n}{N}] \quad (53)$$

em que: T_{med} é a temperatura média do ar (K), e_a é a pressão parcial de vapor (kPa) e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 20,17 \times 10^{-10} mm.K^{-4}.d^{-1}$).

Depois de calculado o balanço das radiações de onda curta e longa, é possível obter o saldo total de radiação da superfície, ilustrado na equação 54.

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} \quad (54)$$

O saldo total de radiação da superfície é utilizado nos processos de evaporação (λE), no aquecimento do ar (H), do solo (G), das plantas (PI) e na fotossíntese (Fo), todos em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$. A fotossíntese e o calor armazenado nas plantas são desprezíveis, assim, tem-se a equação 55, do saldo total de radiação.

$$\text{ET}_{\text{OBE}} = R_n = \lambda E + H + G \quad (55)$$

A equação 55, quando medida em milímetros, passa a ser uma boa aproximação para estimativa de evapotranspiração de referência.

Aplicações de métodos para estimativa de evapotranspiração no Brasil

A região Sul do Brasil é composta pelos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Existem diversos estudos envolvendo métodos empíricos para a estimativa de evapotranspiração, neste documento, alguns desses trabalhos serão apresentados. Syperreck et al. (2008) avaliaram três métodos empíricos: o de Thornthwaite, Camargo e Hargreaves-Samani, e compararam com o método padrão de Penman-Monteith FAO-56 para a região de Palotina, Estado do Paraná. No estudo, os autores observaram que a evapotranspiração de referência, na região, variou entre $2,58 \text{ mm.dia}^{-1}$ e $3,62 \text{ mm.dia}^{-1}$, dependendo do método empregado para estimativa. Os resultados mostraram que, em escala diária, os métodos avaliados, em geral, apresentaram bom ajuste para os coeficientes de correlação e de exatidão de willmott quando comparados ao método de Penman-Monteith.

Para a região de Pelotas-RS, Terra et al. (2009) estimaram a evapotranspiração de referência, em escala de tempo diária, pelos métodos de Blaney-Criddle, Tanque Classe A, Kharrufa, Camargo e Hargreaves-Samani, com o intuito de compararem com o método de Penman-Monteith, a fim de apontar qual dos métodos melhor representa os valores de evapotranspiração. Os resultados mostraram que os métodos do Tanque Classe “A” e de Camargo (CA) apresentaram valores de coeficiente de desempenho (c) iguais a 0,56, sendo classificados, segundo Camargo e Sentelhas (1997), como sofrível. Os demais métodos apresentaram desempenho classificado como bom, com valores do coeficiente “c” iguais a 0,66, 0,74 e 0,70, respectivamente. Por fim, os autores concluíram que o método de Hargreaves-Samani foi o que apresentou a melhor estimativa da ETo para valores diários, comparativamente ao método de Penman-Monteith FAO-56, para a região de Pelotas-RS.

Back (2008) avaliou o desempenho de nove métodos empíricos (Blaney & Criddle, Hargreaves, Hargreaves Modificado, Hargreaves-Samani, Ivanov, Thornthwaite, Thornthwaite modificado, Thornthwaite modificado 2 e Camargo) para obtenção da evapotranspiração para períodos decendiais e mensais para o Município de Urussanga-SC. No trabalho, o autor também comparou os valores obtidos com o método de Penman-Monteith FAO-56. Os resultados permitiram concluir que os métodos de Ivanov e de Hargreaves-Samani subestimaram a evapotranspiração em todos os meses do ano, enquanto que os métodos de Blaney & Criddle, Hargreaves, Hargreaves modificado e Thornthwaite modificado superestimaram os valores de evapotranspiração também em todos os meses. O método de Hargreaves foi o que apresentou ótimo desempenho tanto para o intervalo mensal quanto para o decendial, com o menor erro padrão de estimativa. Os métodos de Camargo e Thornthwaite apresentaram desempenho muito bom na escala mensal, enquanto que os métodos de Blaney & Criddle, Hargreaves-Samani e Thornthwaite modificado apresentaram péssimo desempenho.

Kobiyama e Vestena (2006) estimaram a evapotranspiração potencial diária para quatro localidades no Estado do Paraná (Piraquara,

Guarapuava, Cascavel e Paranavaí) utilizando o método de Penman modificado por Doorenbos e Pruitt (1984). Os autores encontraram valores médios anuais de evapotranspiração potencial entre 1.137 mm a 1.580 mm e observaram que a evapotranspiração potencial apresentou uma elevada correlação com a temperatura do ar e praticamente nenhuma correlação com a precipitação pluvial.

A região Sudeste do Brasil compreende os estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo. Vanzela et al. (2007) avaliaram o desempenho do método do Tanque Classe “A” para estimar a evapotranspiração de referência para a região de Ilha Solteira-SP, sendo que a base para comparação foram os valores obtidos pelo método de Penman-Monteith. Com a análise dos resultados, os autores concluíram que o método do Tanque Classe “A” apresentou péssimo desempenho para estimar a evapotranspiração para essa região.

Para a região de Uberlândia, MG, Carvalho et al. (2009) avaliaram diferentes metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições climáticas daquela região. As metodologias foram comparadas com o método padrão de Penman-Monteith. Os resultados permitiram observar que a evapotranspiração estimada pelo método de Priestley & Taylor foi a que melhor se ajustou ao método de Penman-Monteith, obtendo um coeficiente de correlação de Pearson de 0,94 e índice de exatidão de Willmott de 0,92. Já para os métodos de Hargreaves-Samani e Thornthwaite, os autores observaram que foram semelhantes, obtendo um índice de desempenho igual a 0,70 e 0,68, respectivamente. O método de Camargo apresentou índice de desempenho e coeficiente de Pearson considerados medianos. O método do Tanque Classe “A” foi considerado como o pior método, obtendo péssimo desempenho, apenas 0,19, e de 0,37 e 0,50 para coeficiente de correlação de Pearson e índice de exatidão, respectivamente. Esses resultados contrariam os obtidos por Carvalho et al. (2006), os quais obtiveram desempenho ótimo ao comparar os valores de evapotranspiração estimados pelo Tanque Classe “A” e os medidos por lisímetro de pesagem automática, na região de Seropédica-RJ. Oliveira et al. (1998) também verificaram desempenho satisfatório

para o método do Tanque Classe “A”, para estimativas diárias de evapotranspiração para a região de Viçosa, MG.

Mendonça et al. (2003) compararam os valores de evapotranspiração obtidos em lisímetro de pesagem com grama com os valores resultantes da utilização dos métodos de Penman-Monteith FAO-56, Radiação Solar, Makkink, Linacre, Jensen & Haise, Hargreaves-Samani, Tanque Classe “A” e Atmômetro SEEI modificado, para a região norte Fluminense-RJ. Os autores concluíram que todos os métodos avaliados, com exceção do Atmômetro SEEI modificado, atenderam satisfatoriamente à estimativa da evapotranspiração para a região, principalmente em períodos de 7 e 10 dias. Os autores ainda concluíram que na falta de dados referentes às variáveis climáticas, o método de Hargreaves apresenta boa precisão para estimar os valores de evapotranspiração para a região, entretanto, para períodos de tempo superiores a 10 dias.

Para o Estado do Espírito Santo, Bragança et al. (2010) compararam a estimativa da evapotranspiração de referência em três localidades para o período chuvoso. Os resultados permitiram aos autores ranquear os métodos pelo coeficiente de desempenho de Camargo e Sentelhas (1997). O método de Turc obteve o melhor desempenho ($c = 0,93$), seguido por Penman original ($c = 0,78$), Blaney & Criddle e Munkink ($c = 0,76$) e Hargreaves, com péssimo desempenho ($c = 0,23$)

Para a região de Goiânia-GO, Oliveira et al. (2005) compararam os métodos empíricos para estimar os valores de evapotranspiração de Penman original, Blaney & Criddle FAO, Radiação Solar, Hargreaves-Samani e Tanque Classe “A”. Os autores assumiram os valores obtidos pelo método Penman-Monteith como os valores reais de evapotranspiração. Por meio dos resultados, os autores concluíram que os métodos de estimativa de evapotranspiração avaliados superestimaram os valores entre os meses de março e dezembro e subestimaram para os meses de janeiro e fevereiro. Através da comparação com o método de Penman-Monteith, podem-se classificar os métodos da seguinte maneira, do melhor para o pior: Penman

original, Blaney & Criddle, Radiação Solar, Hargreaves-Samani e Tanque Classe “A”, para todos os meses do ano. Para o período seco, o melhor método foi o de Penman original, enquanto que para o período chuvoso, o melhor método foi o Blaney & Criddle. Os autores ainda concluíram que nos métodos de Hargreaves-Samani e do Tanque Classe “A” existe a necessidade de ajustar localmente os coeficientes das equações. No geral, o método de Blaney & Criddle apresentou uma boa alternativa quando se dispõe apenas de dados de temperatura do ar.

Oliveira et al. (2001) compararam os métodos de estimativa de evapotranspiração para algumas localidades do Estado de Goiás e Distrito Federal. Os métodos avaliados foram: Penman FAO, Hargreaves e de Radiação Solar. Pelos resultados, os autores concluíram que para o Município de Goiânia, todos os modelos apresentaram alta significância com o método de padrão Penman-Monteith, e o modelo que mais se aproximou do padrão foi o de Penman FAO, seguidos pelos modelos de Hargreaves e de Radiação solar. As demais localidades apresentaram o mesmo comportamento.

Fernandes et al. (2009) compararam os valores médios diários da evapotranspiração estimada pelo método de Hargreaves com os valores obtidos pelo método padrão de Penman-Monteith para o Município de Santo Antônio de Goiás-GO, para o período de 1983 a 2004. Os autores observaram que o método de Hargreaves superestima os valores de evapotranspiração, quando comparados com o método padrão de estimativa de evapotranspiração. Os autores concluíram que o método de Hargreaves pode ser utilizado desde que os coeficientes da equação sejam calibrados.

Na região do pantanal Sul-Mato-Grossense, Soriano e Pereira (1993) avaliaram vários métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, tendo como método padrão a evapotranspiração potencial estimada pelo método do Tanque Classe “A”. Os autores utilizaram a regressão linear entre as estimativas dos métodos e do Tanque Classe “A”, e concluíram que, para a sub-região da Nhecolândia, não houve supremacia dos métodos baseados no balanço de energia sobre

aqueles que utilizam apenas a temperatura do ar ou a radiação solar como variável independente. Os métodos da Radiação Solar, Priestly & Taylor, Makkink e Jensen & Haise foram calibrados para a região, o que ocasionou um melhorando substancial de suas estimativas. As mudanças mais significativas ocorreram com o parâmetro de Priestley & Taylor, que mostrou tendência linear negativa com a temperatura média do ar.

No Estado do Ceará, Almeida et al. (2010) compararam 11 métodos de estimativa de evapotranspiração de referência para a região de Fortaleza. Os métodos que apresentaram melhor desempenho para essa região, comparados com o método padrão de Penman-Monteith FAO-56, foram o Blaney & Criddle e Kimberly-Penman. O método de Blaney & Criddle, indicado pela FAO para estimativas mensais, necessita de menor quantidade de dados climatológicos em relação ao método padrão, porém, apresentou péssimo desempenho para a região de Fortaleza. Os métodos Tanque Classe “A” e Makkink foram os que mais subestimaram a ETo em Fortaleza-CE em 28%, 16% e 18,37%, respectivamente. Essa subestimativa quanto a Makkink também foi encontrada por Turco et al. (2008), o que é explicado pelo fato de que esse método foi desenvolvido em regiões frias, ocasionando subestimativa quando usado em regiões quentes.

Tagliaferre et al. (2010) avaliaram o desempenho dos métodos empíricos Penman FAO-24, Radiação Solar FAO-24, Blaney & Criddle FAO-24, Hargreaves-Samani, Priestley & Taylor e Turc em relação ao método padrão Penman-Monteith FAO-56 para as condições climáticas do Município de Eunápolis-BA. Os resultados permitiram concluir que o método de Blaney & Criddle e da Radiação Solar apresentaram melhor desempenho para estimativa da evapotranspiração de referência para todos os períodos em que os autores estudaram. Os métodos de Priestley & Taylor e Turc subestimaram os valores de evapotranspiração obtidos pelo método padrão de Penman-Monteith FAO-56. O método de Hargreaves-Samani foi o que obteve o pior desempenho.

Sousa et al. (2010) determinaram a evapotranspiração de referência através de vários métodos de estimativa para o Estado do Sergipe. Os autores concluíram que para os perímetros irrigados do estado, os valores obtidos pelos métodos do Tanque Classe “A”, Hargreaves, Prestley & Taylor, Jensen & Haise e do Linacre se distanciam, nessa ordem, daqueles obtidos com o método padrão de Penman-Monteith. Os métodos de obtenção da evapotranspiração que incorporam o saldo de radiação solar são os que apresentam os valores mais próximos daqueles obtidos pelo método de Penman-Monteith.

Referências

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and drainage paper, 56).
- ALMEIDA, B. M.; ARAÚJO, E. M.; CAVALCANTE JUNIOR, E. G.; OLIVEIRA, J. B.; ARAÚJO, E. M.; NOGUEIRA, B. R. C. 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.
- BACK, A. J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga, SC. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 4, p. 449-466, 2008.
- BERLATO, M. A.; MOLION, L. B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1981. 95 p. (IPAGRO. Boletim técnico, 7).
- BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. O. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data**. Washington: USDA, 1950. 48 p. (Technical paper, n. 96).

BRAGANCA, R.; REIS, E. F. dos; GARCIA, G. de 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, mayo/agosto 2010.

BRUTSAERT, W. Catchment scale and the atmospheric boundary layer. **Water Resources Research**, Washington, v. 23, n. 9S, p. 39S-45S, 1986.

CAMARGO, A. P. de. **Balço hídrico no Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1971. 28 p. (IAC. Boletim técnico, 116).

CAMARGO, A. P. de; CAMARGO, M. B. P. de. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.

CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 87-89, 1997.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; COSTA, J. R.; CRUZ, F. A. Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica - RJ, utilizando lisímetro de pesagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 187-95, 2006.

CARVALHO, H. de P.; SILVA, V. J. da; PAULA, A. F. F. de C.; RABELO, P. G. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Uberlândia-MG. In: JORNADA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 9., 2009, Recife. **Anais**. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2009. 1 CD-ROM.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Estimativa da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar para as condições do Baixo Rio Grande, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 229-236, 2003.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1984. 178 p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 24).

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L. F. da; AMORIM, A. de O.; OLIVEIRA, D. F. de. Comparação entre dois métodos de estimativa de evapotranspiração de referência para Santo Antônio de Goiás, GO: Hargreaves versus Penman-Monteith. In: ENCONTRO SUL BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 3., 2009, Santa Maria. **Mudanças climáticas globais: efeitos sobre o tempo e clima regional: [anais]**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2009. 1 CD-ROM.

FREVERT, D. R.; HILL, R. W.; BRAATEN, B. C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 109, n. 2, p. 265-270, 1983.

FRIZZONE, J. A. **Análise de decisão econômica em irrigação**. Piracicaba: ESALQ, 2004. 371 p. (ESALQ. Série didática, 17).

GARCIA BENAVIDES, J.; LOPEZ DIAZ, J. Formula para el calculo de la evapotranspiracion potencial adaptada al tropico (15° N - 15° S). **Agronomia Tropical**, Maracay, v. 20, n. 5, p. 335-345, 1970.

HAMON, W. R. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, v. 87, p. 107-120, 1961.

HARGREAVES, G. H. Estimation of potential and crop evapotranspiration. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 17, n. 4, p. 701-704, 1974.

JENSEN, M. E., HAYSE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 89, n. 4, p. 15-41, Dez. 1963.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 332 p.

KASHYAP, P. S.; PANDA, R. K. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 50, n. 1, p. 9-25, Aug. 2001.

KHARRUFA, N. S. Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. **Beiträge zur Hydrologie: Sonderheft**, Kirchzarten, v. 5, n. 1, p. 39-47, 1985.

KOBIYAMA, M.; VESTENA, L. R. Aplicação do método de Penman modificado no cálculo da evapotranspiração potencial para quatro estações meteorológicas do Estado do Paraná. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 8, n. 1, p. 83-97, jan./jun. 2006.

LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 18, n. 6, p. 409-424, 1977.

MAKKINK, G. F. Ekzamento de la formulo de Penman. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v. 5, p. 290-305, 1957.

MATZENAUER, R. Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficientes de cultura. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. p. 31-39.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F. de; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, maio/ago. 2003.

OLIVEIRA, M. A. A. de; CARVALHO, D. F. de. 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**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p. 132-135, maio/ago. 1998.

OLIVEIRA, L. F. C. de; CARVALHO, D. F. de; ROMÃO, P. de 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, jul./dez. 2001.

OLIVEIRA, R. Z.; OLIVEIRA, L. F. C. de; WEHR, T. R.; BORGES, L. B.; BONOMO, R. Comparação de metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Goiânia, GO. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 21, n. 3, p. 9-27, set./dez. 2005.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, London, v. 193, p. 120-145, Apr. 1948.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Porto Alegre: Guaíba Agropecuária, 2002. 478 p.

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

POPOVA, Z.; KERCHEVA, M.; PEREIRA, L. S. Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data: application to South Bulgaria. **Irrigation and Drainage**, v. 55, n. 2, p. 201-215, Apr. 2006. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ird.228/pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2010.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 100, n. 2, p. 81-92, Feb. 1972.

ROMANENKO, V. A. **Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area**. Kiev: Ukrainian Hydrometeorological Research Institute, 1961. 3 p.

ROSEMBERG, N. J.; BLADE, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment**. 2nd ed. New York: J. Wiley, 1983. 495 p.

SALGADO, E. **Curso relación suelo água planta**. Valparaíso: Ediciones Universitárias de Valparaíso , 2001. 184 p. (Serie Ciencias Naturales).

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

SMITH, M.; ALLEN, R.; PEREIRA, P. Revised FAO methodology for crop water requirements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVAPOTRANSPIRATION AND IRRIGATION SCHEDULING, 1996, San Antonio. **Proceedings...** San Antonio: American Society of Agricultural Engineers, 1996. p. 116-123.

SORIANO, B. M. A.; PEREIRA, A. R. Estimativa da evapotranspiração de referência para a sub-região Nhecolândia, Pantanal Matogrossense. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 123-129, jul. 1993.

SOUSA, I. F. de; SILVA, V. de P. R.; SABINO, F. G.; NETTO, A. de O. A.; SILVA, B. K. N.; AZEVEDO, P. V. de. Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do estado de Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 6, p. 633-644, 2010.

SYPERRECK, V. L. G.; KLOSOWSKI, E. S.; GRECO, M.; FURLANETTO, C. Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 5, p. 603-609, 2008.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R. A. de J.; ROCHA, F. A.; SANTOS, L. da C.; SILVA, C. dos S. da. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis-BA. **Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.

TANNER, C. B.; PELTON, W. L. Potential evapotranspiration estimates by approximate energy balance method of Penman. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 65, n.10 p. 3391-3413, 1960.

TERRA, V. S. S.; TEIXEIRA, C. F. A.; REISSER JÚNIOR, C.; MADALUZ, L. M.; STEINMETZ, S.; ALMEIDA, I. R. de; TIMM, L. C. Evapotranspiração de referência por diferentes métodos para a região de Pelotas/RS. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 18.; ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 11.; MOSTRA CIENTÍFICA, 1., 2009, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Univesidade Federal de Pelotas, 2009. 1 CD-ROM.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2007. p. 269-278.

TURC, L. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. **Annales Agronomiques**, Paris, v. 12, n. 1, p. 13-49, 1961.

TURCO, J. E. P.; PERECIN, D.; PINTO JÚNIOR, D. L. Influência da acurácia de instrumentos de medidas na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p. 63-80, jan./mar. 2008.

VALDIVIA, P. G. **Monitoramento hidrogeológico da bacia-piloto do ribeirão da Onça em zona de afloramento do sistema aquífero Guarani determinação da evapotranspiração**. 2005. 43 p. Trabalho de conclusão de curso, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; FERREIRA, E. J. S.
Desempenho da estimativa da evapotranspiração de referência em Ilha Solteira-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito. **Inovação tecnológica: reorganização e sustentabilidade dos espaços produtivos: anais**. Bonito: SBEA: Embrapa Agropecuária Oeste, 2007. 1 CD-ROM.