



**Avaliação de Métodos de Estimativa da
Evapotranspiração de Referência para Fins de Manejo da Irrigação**
Evaluation of Methods for Reference
Evapotranspiration Estimation for Irrigation Water Management

Célia Maria Paiva & Alexandre da Silva Pinheiro de Souza

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências - Departamento de Meteorologia.

Av. Athos da Silveira Ramos, s/n – Bloco H, Sala G1-016 –

Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 21941-916, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

E-mails: celia@lma.ufrj.br; alexandregeop@yahoo.com.br

Recebido em: 23/07/2015 Aprovado em: 10/12/2015

DOI:http://dx.doi.org/10.11137/2016_1_42_51

Resumo

O conhecimento da evapotranspiração das culturas é muito importante para o manejo da irrigação. A equação FAO56 Penman-Monteith tem sido recomendada pela FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) como método padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0). Entretanto, esse método requer variáveis meteorológicas que em geral não são medidas nas estações meteorológicas no Brasil. Por isso, o objetivo deste estudo foi avaliar cinco métodos empíricos e comparar seus desempenhos com o de Penman-Monteith para as condições climáticas da região de Pirai do Sul no Estado do Paraná. Para tanto, foram utilizados dados meteorológicos registrados por uma plataforma de coleta de dados durante o período de 04/07/2008 a 12/10/2008 em uma cultura de trigo. Os resultados indicam que a ET_0 pode ser estimada adequadamente pelos métodos da Radiação Solar, Jensen-Haise e Makkink. O pior desempenho foi apresentado pelo método de Hargreaves-Samani, seguido do método de Camargo.

Palavras chave: Agrometeorologia; Evapotranspiração de Referência; Avaliação de Métodos; Manejo da Irrigação

Abstract

Knowledge of the evapotranspiration is very important regarding activities connected to water management of the irrigated agriculture. The equation of Penman-Monteith FAO56 has been recommended by FAO, the Food and Agriculture Organization of the United Nations, as the standard for estimating reference evapotranspiration (ET_0). But this equation requires many variables that are not available at most weather stations in Brazil. Therefore, the aim of this study was to analyze five empirical methods to estimate reference evapotranspiration (ET_0) and compare then with the Penman-Monteith FAO56 for the climatic conditions in the city of Pirai do Sul, Paraná state, Brazil. The meteorological data were measured for the period 04/07/2008 to 12/10/2008 for an automatic weather station during the growing season of wheat crop. The results shows that, for the climatic conditions of the studied location, the best methods to estimate reference evapotranspiration were: Solar Radiation, Jensen-Haise and Makkink. The worst performance were presented by the method of Hargreaves-Samani, followed by the method of Camargo.

Keywords: Agrometeorology; Reference Evapotranspiration; Irrigation Water Management

1 Introdução

Em pleno século XXI, a humanidade depara-se com problemas em relação à escassez da água, um recurso indispensável à vida no planeta Terra. Ao contrário das gerações passadas, na atual, o conceito de que a água é um recurso renovável não se aplica mais. Como tal deve ser bem utilizada, bem distribuída e aplicada.

A água é um recurso estratégico para a humanidade, sendo essencial para manter a vida no planeta Terra, sustentar a biodiversidade e para a produção de alimentos. A água, portanto, tem importância ecológica, econômica e social. Nenhuma civilização terá sua sobrevivência, seu desenvolvimento cultural, social e econômico garantidos sem esse recurso natural.

O Brasil possui entre 12% e 16% da água doce do planeta. No entanto, os volumes de água *per capita* variam bastante ao longo de seu território, tendo em vista a distribuição de água e a densidade da população diferenciada por região. Os usos múltiplos causam grandes impactos nas águas superficiais e subterrâneas em várias regiões, devido principalmente às atividades agrícolas (irrigação) e industriais.

As fontes de água doce têm sofrido nos últimos cem anos em razão de um conjunto de atividades humanas sem precedentes na história. Diversos fatores têm produzido crises de abastecimento e crises na qualidade das águas (desmatamento, ocupação de bacias hidrográficas, construção de hidrovias, urbanização acelerada, usos intensivos das águas superficiais e subterrâneas na agricultura e na indústria). O aumento intenso de demanda diminui a disponibilidade de água líquida e coloca em perigo os usos múltiplos, a expansão econômica e a qualidade de vida das populações.

Esse conjunto de problemas levou à atual situação da água, uma crise que demanda ações de curto, médio e longo prazo. Em função disso, as últimas resoluções das Nações Unidas sobre o problema da água implementou a Década Mundial da água a partir de 2005, visando o gerenciamento dos recursos hídricos integrado ao nível de bacias hidrográficas, que promova uma alteração substancial na demanda e diminuam desperdícios.

A crescente demanda por água doce, devido a um maior desenvolvimento econômico e populacional mundial, tanto na agricultura como para outros fins, e sua potencial escassez, exigem um uso racional desse recurso. Sendo esse um recurso finito, pode ocorrer, em alguns locais, uma tendência à exaustão das reservas de água de boa qualidade, inviabilizando determinados usos essenciais, como o abastecimento humano e a produção de alimentos (Carmo *et al.*, 2005).

Aperfeiçoar a gestão dos recursos hídricos é o primeiro passo para sua conservação. Nesse sentido, a evapotranspiração, como uma das componentes do balanço de água, é de grande utilidade em climatologia, para a quantificação das disponibilidades hídricas regionais (Cardoso & Marcelino, 2005). A estimativa das perdas por evaporação e transpiração é de grande importância para atividades como projetos de irrigação, gerenciamento de reservatórios e planejamento de uso e outorga de recursos hídricos, entre outras (Borges & Mendiondo, 2007).

Hoje, a demanda hídrica para a agricultura é um fator crítico. De acordo com Christofidis (2001), calcula-se que 70% do consumo de água das atividades humanas seja destinado para a prática de irrigação no setor agrícola. Inevitavelmente, o uso intensivo da água para a agricultura afeta negativamente as reservas hídricas. O conhecimento da oferta hídrica e o manejo adequado da irrigação permite um maior aproveitamento dos recursos hídricos e o retorno econômico dos investimentos (Araújo, 2007; Neto *et al.*, 2011; Carvalho *et al.*, 2011).

O consumo de água pelas culturas é expresso na forma de evapotranspiração. Segundo Borges & Mendiondo (2007), evapotranspiração é a perda de água de uma superfície com qualquer tipo de vegetação e sob qualquer condição de umidade do solo. Essa é uma variável de extrema importância para a modelagem hidrológica e para a racionalização do uso da água na agricultura.

Segundo Souza (2011), a determinação da evapotranspiração em condições de campo não é uma tarefa fácil, uma vez que sua medida depende de métodos pouco práticos em termos operacionais de manejo de irrigação. Dentre tais métodos pode-se citar o lisímetro, a razão de Bowen, a correlação

turbulenta, a determinação da umidade do solo, entre outros. Entretanto, além de pouco práticos, envolvem custos elevados para sua implementação e manutenção, o que torna tal aplicação muitas vezes proibitiva.

Objetivando a simplificação de tais cálculos, definiu-se o conceito de evapotranspiração de referência (Allen *et al.*, 1998), que necessita apenas de dados meteorológicos para sua quantificação, podendo ser ajustada posteriormente às condições específicas de vegetação e umidade do solo (Mantovani, 1993). Para a quantificação dessa grandeza, utilizam-se modelos empíricos ou determinísticos com embasamento físico (Soares *et al.*, 2003). A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (*Food and Agriculture Organization* – FAO) recomenda o uso do método de Penman-Monteith FAO56 para a estimativa de evapotranspiração (Allen *et al.*, 1998). Entretanto, esse modelo apresenta um nível de exigência de dados que dificulta sua aplicação, tais como radiação líquida e fluxo de calor no solo, nem sempre disponíveis em algumas regiões (Carmo *et al.*, 2005). Nesses casos, a alternativa, seria o uso de equações simplificadas ou empíricas, que, conseqüentemente, perdem muito da realidade física, que é compensada ou substituída por relações estatísticas oriundas de experimentos de campo. Essas equações empíricas são adequadas para o local onde foram calibradas. No entanto, fora das condições em que foram definidas, precisam ser avaliadas e, se for o caso, ajustadas regionalmente (Mantovani, 1993).

Por outro lado, o que se observa em âmbito nacional é o uso inadequado de equações empíricas. Vale ressaltar que tal prática é motivada, muitas vezes, pela falta de dados para avaliação e calibração local dessas equações, antes de sua utilização. Vepraskas *et al.* (2006) mencionam que os erros de estimativa da evapotranspiração são uma das maiores fontes de erros para os modelos hidrológicos. Nesse sentido, fazem-se necessários estudos que determinem os erros médios de tais equações empíricas para diferentes condições climáticas, tendo em vista que a evapotranspiração é uma variável crucial para a modelagem hidrológica.

Desta forma, o presente estudo considerou equações empíricas, com diversos graus de complexidade, que tiveram suas estimativas de

evapotranspiração de referência confrontadas com a equação FAO56 Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) para a região agrícola de Pirai do Sul no Estado do Paraná. Os métodos avaliados foram: Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1982; 1985), Camargo (Camargo, 1971), Makkink, Jessen-Haise e Radiação Solar (Pereira *et al.*, 1997).

2 Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo e Dados Utilizados

A Fazenda Cambara localiza-se no município de Pirai do Sul, Estado do Paraná, cuja área total do talhão considerado neste estudo compreendia 121,03 hectares, com ponto central nas coordenadas geográficas iguais a 24°25'13,86" S e 50°05'14,37" O. Segundo a classificação de Koppen, as condições climáticas desta região se enquadram ao tipo climático Cfb, clima temperado, com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C e no mês mais quente abaixo de 22°C, com precipitação média anual entre 1600 mm e 1800 mm. O talhão de 121 hectares foi semeado com trigo no dia 03 de junho e colhido no dia 27 de outubro de 2008.

Os dados meteorológicos foram coletados através de uma Plataforma de Coleta de Dados (PCD), programada para registro de informações em intervalo de 30 minutos, durante o período de 04 de julho a 12 de outubro de 2008. Os dados coletados correspondem as seguintes grandezas: intensidade do vento (ms⁻¹), temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), radiação solar global (Wm⁻²), saldo de radiação (Wm⁻²), fluxo de calor no solo (Wm⁻²) e precipitação (mm).

2.2 Evapotranspiração de Referência pelo Método FAO56 Penman-Monteith

O método FAO56 Penman-Monteith é expresso pela seguinte equação (Allen *et al.*, 1998):

$$ET_{o_FPM} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - S) + \gamma \cdot \frac{900}{T_{ar} + 273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (1)$$

onde,

ET_{o_FPM}: evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith [mm.dia⁻¹];

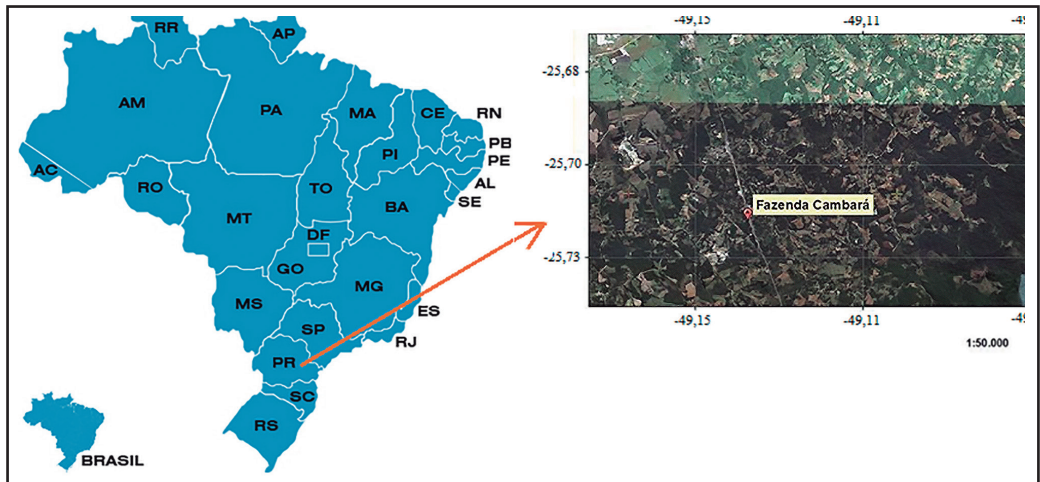


Figura 1 Localização da Fazenda Cambará em Pirai do Sul, Estado do Paraná.

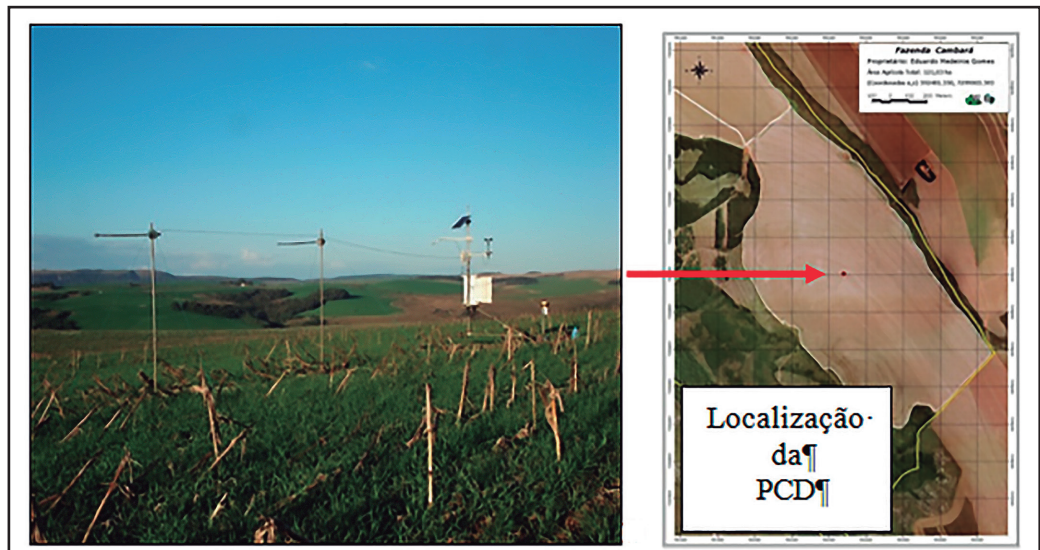


Figura 2 Plataforma de coleta de dados instalada na Fazenda Cambará, Pirai do Sul – PR.

Δ : tangente à curva de pressão de vapor [kPa.°C⁻¹];

R_l : Saldo de radiação ou radiação líquida [MJ.m⁻².dia⁻¹];

S : fluxo de calor sensível para o solo [MJ.m⁻².dia⁻¹];

γ : constante psicrométrica [kPa.°C⁻¹];

T_{ar} : temperatura do ar média diária medida a 2 metros [°C];

U_2 : intensidade do vento média diária medida a 2 metros [m.s⁻¹];

e_s : pressão de vapor de saturação [kPa];

e_a : pressão de vapor atual [kPa].

2.3 Evapotranspiração de Referência pelo Método de Hargreaves

O método de Hargreaves é expresso pela seguinte equação (Hargreaves & Samani, 1982; 1985):

$$ET_{o_HG} = 0,0023 \cdot (T_{ar} + 17,8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot R_a \quad (2)$$

onde,

ET_{o_HG} : evapotranspiração de referência estimada pelo método de Hargreaves [mm.dia⁻¹];

T_{ar} : temperatura do ar média diária [°C];

T_{max} : temperatura do ar máxima diária [°C];

T_{min} : temperatura do ar mínima diária [°C];

R_a : radiação solar no topo da atmosfera total diária [mm.dia⁻¹].

2.4 Evapotranspiração de Referência pelo Método de Camargo

O método de Camargo é expresso pela seguinte equação (Camargo, 1971):

$$ET_{o_CM} = F \cdot R_a \cdot T_{ar} \quad (3)$$

onde,

ET_{o_CM} : evapotranspiração de referência estimada pelo método de Camargo [mm.dia⁻¹];

F: fator de ajuste que varia com a temperatura média do local (valor utilizado F = 0,01);

R_a : radiação solar no topo da atmosfera total diária [mm.dia⁻¹].

T_{ar} : temperatura do ar média diária [°C];

2.5 Evapotranspiração de Referência pelo Método de Jensen-Haise

O método de Jensen-Haise é expresso pela seguinte equação (Pereira *et al.*, 1997):

$$ET_{o_JH} = (0,0252 \cdot T_{ar} + 0,078) \cdot R_g \quad (4)$$

onde,

ET_{o_JH} : evapotranspiração de referência estimada pelo método de Jensen-Haise [mm.dia⁻¹];

T_{ar} : temperatura do ar média diária [°C];

R_g : radiação solar global total diária [mm.dia⁻¹].

2.6 Evapotranspiração de Referência pelo Método da Radiação Solar

O método da Radiação Solar é expresso pela seguinte equação (Pereira *et al.*, 1997):

$$ET_{o_RS} = -0,3 + c_1 \cdot W \cdot R_g \quad (5)$$

$$c_1 = 1,0656 - 0,0012795 \cdot UR + 0,044953 \cdot U_2 - 0,00020033 \cdot UR \cdot U_2 - 0,0000315 \cdot 08 \cdot UR^2 - 0,0011026 \cdot U_2^2 \quad (6)$$

$$W = 0,407 + 0,0145 \cdot T_{ar} \quad \text{Para } 0 < T_{ar} < 16^\circ\text{C} \quad (7)$$

$$W = 0,483 + 0,01 \cdot T_{ar} \quad \text{Para } 16,1 < T_{ar} < 32^\circ\text{C} \quad (8)$$

onde,

ET_{o_RS} : evapotranspiração de referência estimada pelo método da Radiação Solar [mm.dia⁻¹];

T_{ar} : temperatura do ar média diária [°C];

R_g : radiação solar global total diária [mm.dia⁻¹];

U_2 : intensidade do vento média diária medida a 2 metros [m.s⁻¹];

UR: umidade relativa do ar [%];

2.7 Evapotranspiração de Referência pelo Método de Makkink

O método de Makkink é expresso pela seguinte equação (Pereira *et al.*, 1997):

$$ET_{o_MK} = 0,87 \cdot W \cdot R_g \quad (9)$$

$$W = 0,407 + 0,0145 \cdot T_{ar} \quad \text{Para } 0 < T_{ar} < 16^\circ\text{C} \quad (10)$$

$$W = 0,483 + 0,01 \cdot T_{ar} \quad \text{Para } 16,1 < T_{ar} < 32^\circ\text{C} \quad (11)$$

onde,

ET_{o_MK} : evapotranspiração de referência estimada pelo método de Makkink [mm.dia⁻¹];

T_{ar} : temperatura do ar média diária [°C];

R_g : radiação solar global total diária [mm.dia⁻¹].

2.8 Avaliação da Influência das Variáveis Meteorológicas no Fenômeno da ET_o

Inicialmente as estimativas da evapotranspiração de referência (ET_o) obtidas pelo método FAO56 Penman-Monteith foram comparadas com as variáveis meteorológicas que governam o fenômeno da ET_o (radiação solar global, temperatura e umidade do ar e intensidade do vento), na tentativa de se apontar a participação de cada uma delas no fenômeno investigado. A comparação foi feita com o mé-

todo FAO56 Penman-Monteith pelo fato de ele ser um método físico com muito poucas aproximações empíricas, enquanto os demais métodos avaliados são totalmente empíricos. Para tanto, foram utilizados os coeficiente de correlação e o coeficiente de regressão.

2.9 Avaliação das Estimativas da Evapotranspiração de Referência

Os métodos avaliados foram classificados em relação aos seus respectivos desempenhos a partir do desvio médio absoluto (*DMA*), Desvio médio relativo (*DMR*), índice de concordância ou índice de Willmott (*d*), coeficiente de confiança (*c*), coeficiente de correlação (*r*) e de determinação (*r*²), como segue:

$$DMA = \sqrt{\frac{\sum (ET_{o*} - ET_{o_FPM})^2}{\eta}} \quad (12)$$

$$DMR = \sqrt{\frac{\sum (ET_{o*} - ET_{o_FPM})^2}{ET_{o_FPM}}} \times 100 \quad (13)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (ET_{o*} - ET_{o_FPM})^2}{\sum (|ET_{o*} - ET_{o_FPM}| + |ET_{o_FPM} - ET_{o*}|)^2} \right] \quad (14)$$

$$c = r \times d \quad (15)$$

$$r = \frac{n \sum ET_{o_FPM} ET_{o*} - \sum ET_{o_FPM} \sum ET_{o*}}{\sqrt{n \sum ET_{o_FPM}^2 - (\sum ET_{o_FPM})^2} \sqrt{n \sum ET_{o*}^2 - (\sum ET_{o*})^2}} \quad (16)$$

$$r^2 = \frac{\sum (ET_{o*} - ET_{o_FPM})^2}{\sum (ET_{o*} - ET_{o_FPM})^2 + \sum (ET_{o*} - ET_{o_FPM})^2} \quad (17)$$

*ET*_{o*}: evapotranspiração estimada pelo método em avaliação [mm.dia⁻¹];

*ET*_{o_FPM}: evapotranspiração estimada pelo método de FAO-56 Penman Monteith [mm.dia⁻¹];

η: número de estimativas.

O coeficiente *c*, proposto por Camargo & Sentelhas (1997), é interpretado de acordo com os referidos autores, a saber:

Valores do Coeficiente	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 e 0,65	Mediano
< 0,60	Ruim

Tabela 1 Valores do coeficiente de confiança e sua classificação.

O coeficiente de correlação pode variar de -1 a +1. Silva & Barros Filho (2003) sugerem o critério apresentados na tabela abaixo para classificação das correlações.

Valores do coeficiente (r)	Classificação da correlação
1	Perfeita Positiva
0,70 a 0,99	Muito Forte Positiva
0,30 a 0,69	Moderada Positiva
0,01 a 0,29	Fraca Positiva
0	Nenhuma
-0,01 a -0,29	Fraca Negativa
-0,30 a -0,69	Moderada Negativa
-0,70 a -0,99	Muito Forte Negativa
-1	Perfeita Negativa

Tabela 2 Valores do coeficiente de correlação e sua classificação.

O índice de concordância, proposto por Willmott *et al.* (1985), pode variar entre 0 e 1 para nenhuma concordância e para uma concordância perfeita, respectivamente.

3 Resultados e Discussão

3.1 Comparação entre as estimativas da *ET*_o por FAO56 Penman-Monteith e as variáveis meteorológicas

Na Tabela 3 são listados os coeficientes de correlação (*r*) entre a *ET*_o estimada pelo método FAO-56 Penman Monteith (FPM) e as variáveis meteorológicas que influenciam essa grandeza. Em ordem decrescente de valores de *r*, observa-se que: a umidade relativa do ar (*UR*) é a variável meteorológica mais correlacionada com o fenômeno da *ET*_o, com um *r* igual a -0,86 ou correlação muito forte; em seguida, tem-se a temperatura máxima do ar (*T*_{max}) com *r* igual a 0,70 ou correlação muito forte; depois a temperatura média do ar (*T*_{ar}) e a radiação solar global (*R*_g) com *r* respectivamente iguais a 0,57 e 0,52 ou correlações moderadas; por fim, as menos correlacionadas são a temperatura mínima do ar (*T*_{min}), a radiação solar no topo da atmosfera

(R_a) e a intensidade do vento (U) com valores de r iguais a 0,27, -0,12 e 0,07 ou correlações fracas, respectivamente. As correlações foram classificadas de acordo com a Tabela 2 referente à metodologia. O valor de r negativo indica que a umidade relativa do ar é inversamente correlacionada com a ET_o , o que está de acordo com o comportamento físico da atmosfera que promove o aumento da evapotranspiração com a diminuição da umidade relativa do ar e vice-versa. Os valores positivos de r indicam que a temperatura do ar (mínima, média e máxima), a radiação solar global e a intensidade do vento são diretamente correlacionadas com a ET_o . Isso significa que o aumento de magnitude dessas variáveis promove maiores taxas de ET_o , o que também está de acordo com a física do fenômeno, que sob maiores regimes térmicos, radiativo ou energético e de intensidade do vento, elevam a ET_o e vice-versa. O valor negativo de r para a radiação solar no topo da atmosfera era esperado, uma vez que essa grandeza não representa as condições de radiação em superfície, tendo em vista a interferência da atmosfera. Portanto, não tem uma significado físico direto para a ET_o .

O coeficiente de determinação r^2 indica o quanto cada variável meteorológica pode influenciar ou explicar o fenômeno da ET_o nas condições atmosféricas reinantes. Por esses valores, observa-se que a umidade relativa explica 74%; a temperatura máxima do ar 50%; a temperatura média do ar 33%, a radiação solar global 27% e a temperatura mínima do ar, a radiação no topo da atmosfera e a intensidade do vento menos de 10%, respectivamente.

	r	Classificação de r	r^2
UR	-0,86	muito forte	0,74
T_{max}	0,70	muito forte	0,50
T_{ar}	0,57	moderada	0,33
R_g	0,52	moderada	0,27
T_{min}	0,27	fraca	0,07
R_a	-0,12	fraca	0,02
U	0,07	fraca	0,01

Tabela 3 Coeficientes de correlação (r) e coeficiente de determinação (r^2) entre a ET_o estimada pelo método FAO56 Penman-Monteith e as variáveis meteorológicas que a governam.

3.2 Avaliação da Estimativa da Evapotranspiração de Referência

Os métodos avaliados foram classificados de acordo com seus respectivos desempenhos, em relação ao método FAO-56 Penman Monteith, a

partir do desvio médio absoluto (DMA), Desvio médio relativo (DMR), índice de concordância ou índice de Willmott (d), coeficiente de confiança (c), coeficiente de correlação (r) e coeficiente de determinação (r^2), conforme a Tabela 4.

O método de Jensen-Haise foi o que apresentou o menor DMR com um valor igual a 21,76% (o que corresponde a um DMA de 0,39 mm.dia⁻¹). O método de Hargreaves foi o que apresentou maior DMR com um valor igual a 70,76% (o que corresponde a um DMA de 0,95 mm.dia⁻¹). Os demais métodos apresentam em ordem crescente os seguintes valores: Radiação Solar igual a 30,68% (0,48 mm.dia⁻¹); Makkink igual a 30,01% (0,53 mm.dia⁻¹); Camargo igual 45,83% (0,69 mm.dia⁻¹). Em termos de desvio médio relativo, o método de Jensen-Haise apresentou um melhor desempenho quando comparado com o método FAO56 Penman-Monteith.

Em relação ao índice de concordância, em ordem crescente os métodos apresentaram os seguintes valores: Hargreaves e Camargo igual a 0,54; Jensen-Haise igual a 0,91; Radiação Solar e Makkink iguais a 0,98. Nesse caso, os métodos que apresentaram melhor desempenho foram o de Makkink e Radiação Solar. No entanto, o método de Jensen-Haise apresentou valores muito próximos a esses últimos métodos. Por outro lado, os métodos de Camargo e Hargreaves apresentaram um desempenho similar entre si e inferior aos demais métodos. Por esse índice, tem-se que os métodos de Makkink, Radiação Solar e Jensen-Haise obtiveram desempenho satisfatório com valores próximos a 1.

Para o coeficiente de correlação, em ordem crescente, os métodos apresentaram os seguintes valores: Camargo igual a 0,36; Hargreaves igual a 0,43; Makkink 0,76; Jensen-Haise e Radiação Solar 0,82. Dessa forma, os métodos de Makkink, Jensen-Haise e Radiação Solar apresentaram uma correlação muito forte com o método FAO56 Penman-Monteith, enquanto que para Camargo e Hargreaves as correlações foram moderadas.

De acordo com o coeficiente de determinação, somente os métodos de Makkink, Jensen-Haise e Radiação Solar apresentaram valores superiores a 0,50 ou 50% (Figuras 3 a 7).

Em relação ao coeficiente de confiança, o método da Radiação Solar apresentou um

desempenho muito bom ($c = 0,80$), os métodos de Makking e Jansen-haise tiveram um bom desempenho ($c = 0,74$). Os demais métodos tiveram um desempenho ruim com valores iguais a 0,23 para Hargreaves e 0,20 para Camargo.

Analisando em conjunto os coeficientes de desempenho da Tabela 4, pode-se concluir que o método da Radiação Solar obteve a melhor combinação de valores e, portanto, o melhor desempenho. Em seguida tem-se o método de Jansen-Haise; Makkink; Camargo; e por fim Hargreaves com o pior desempenho. Dessa forma, os índices da Tabela 4 indicam que os métodos da Radiação Solar, Jensen-Haise e Makkink obtiveram um desempenho satisfatório para a estimativa da ET_o para o local e condições atmosféricas deste estudo.

Em relação às variáveis meteorológicas, pode-se concluir que o método que considerou todas as variáveis que governam o fenômeno (radiação solar global, temperatura e umidade relativa do ar e intensidade do vento) da ET_o foi o que obteve melhor desempenho, ou seja, o método da Radiação Solar. Os métodos que excluíram as variáveis umidade relativa do ar e intensidade do vento, Jensen-Haise e Makking, tiveram desempenho inferior ao método da Radiação Solar. Nesse caso, o descarte da umidade relativa do ar que tem uma correlação muito forte com a ET_o pode ter sido o motivo da diminuição de desempenho desses métodos. Os métodos que excluíram as variáveis umidade relativa do ar, intensidade do vento, radiação global

e consideraram a radiação no topo da atmosfera, apresentam desempenho inferior mais acentuado, foram eles Hargreaves e Camargo. Embora o método de Hargreaves tenha considerado a temperatura máxima do ar que tem uma correlação muito forte com a ET_o , por outro lado descartou UR e R_g que tem correlação muito forte e moderada com essa grandeza, respectivamente. Adicionalmente, incluiu R_a que não tem um significado físico direto para a ET_o por não representar as condições reais em superfície, onde o fenômeno investigado ocorre. Por sua vez, o método de Camargo excluiu UR e R_g , considerando T_{ar} e R_a que tem uma correlação moderada e fraca, respectivamente. Além, do fato de R_a não ter um significado físico direto para a ET_o .

Em suma, esses resultados indicam que, para o local e condições atmosféricas deste estudo, as variáveis meteorológicas mais importantes para a determinação da ET_o foram, em ordem de influência, a UR, T_{max} , T_{ar} e R_g devido às suas correlações muito forte ou moderada, com o fenômeno de influência. Dessa forma, a simplificação dos métodos pode acarretar uma perda de significado físico de suas equações. Além disso, a natureza empírica pode fazer com que eles funcionem bem para o local para onde foram gerados, mas não para locais diferentes. Nesse caso, estão os métodos de Hargreaves e Camargo. Assim fica evidenciada a importância da avaliação dos métodos empíricos de estimativa da ET_o antes de sua aplicação, bem como a influência das variáveis meteorológicas consideradas em suas equações no fenômeno da ET_o .

Método	DMA (mm)	DMR (%)	d	r	r ²	c	Variáveis Meteorológicas
RS	0,48	30,68	0,98	0,82 (muito forte)	0,67	0,80 (muito bom)	T_{ar}, R_g, UR, U
JH	0,39	21,76	0,91	0,82 (muito forte)	0,67	0,74 (bom)	T_{ar}, R_g
MK	0,53	30,01	0,98	0,76 (muito forte)	0,57	0,74 (bom)	T_{ar}, R_g
CM	0,69	45,83	0,56	0,36 (moderado)	0,13	0,20 (ruim)	T_{ar}, R_a
HG	0,95	70,76	0,54	0,43 (moderado)	0,19	0,23 (ruim)	$T_{ar}, T_{min}, T_{max}, R_a$

Tabela 4 Valores do desvio médio absoluto (DMA), Desvio médio relativo (DMR), índice de concordância ou índice de Willmott (d), coeficiente de confiança (c), coeficiente de correlação (r) e coeficiente de determinação (r²).

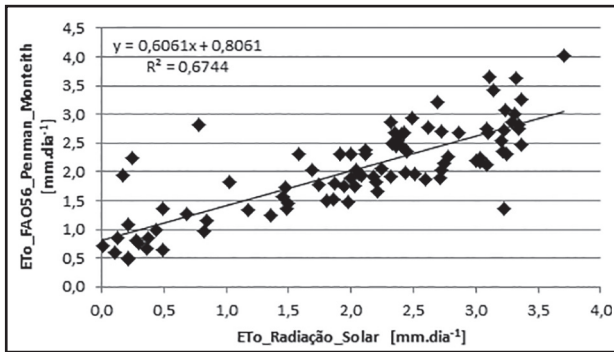


Figura 3 Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Radiação Solar.

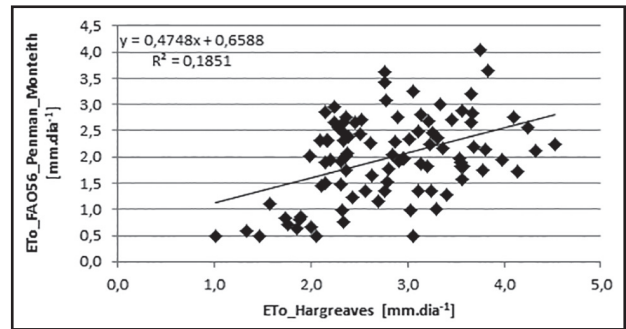


Figura 7 Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Hargreaves.

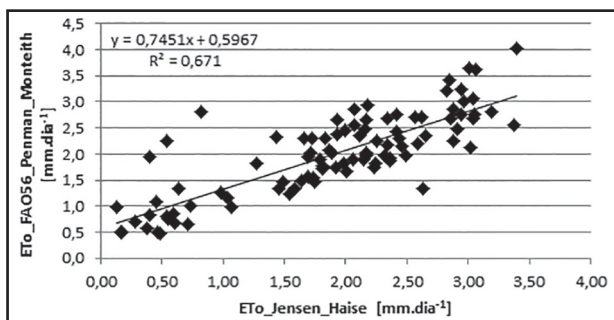


Figura 4 Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Jensen-Haise.

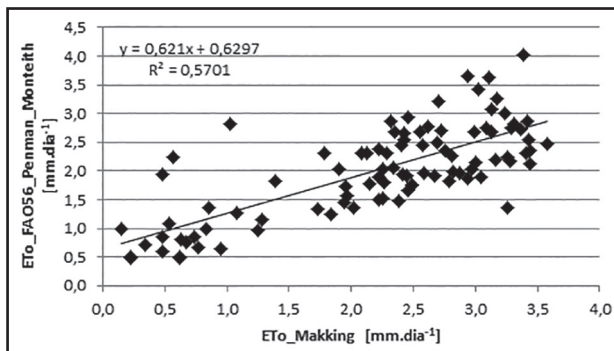


Figura 5 Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Makking.

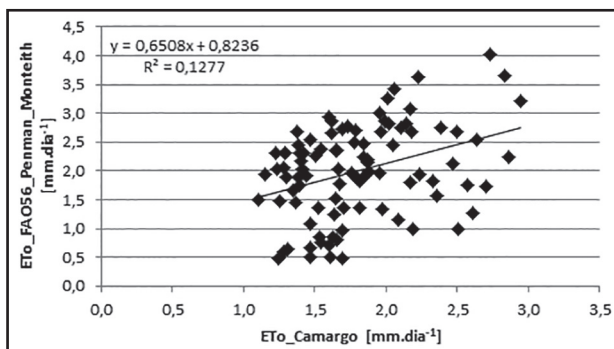


Figura 6 Gráfico de dispersão linear para os métodos FAO56 Penman-Monteith e Camargo.

4 Conclusões

Os resultados analisados permitem chegar a algumas conclusões. Em ordem de importância para a estimativa da ET_0 na região de estudo, tem-se a seguinte classificação em relação às variáveis meteorológicas: umidade relativa do ar e temperatura máxima do ar com influência muito forte; temperatura média do ar e radiação solar global com influência moderada; e por fim temperatura mínima do ar, radiação solar no topo da atmosfera e intensidade do vento com fraca influência.

Os índices utilizados para a avaliação dos métodos indicam que o método da Radiação Solar obteve o melhor desempenho, seguido por Jansen-Haise e Makking. Esses métodos podem ser utilizados na região de estudo por terem tido um bom desempenho. Entretanto, preferencialmente, indica-se a seguinte ordem para o uso dos métodos em função da disponibilidade dos dados na região de interesse: 1º FAO56 Penman-Monteith, 2º Radiação Solar; 3º Jensen-Haise e 4º Makking. Por outro lado, os métodos de Hargreaves e Camargo não são indicados devido ao desempenho ruim dos mesmos.

O melhor desempenho do método da Radiação Solar pode estar relacionado ao fato desse método utilizar todas as variáveis meteorológicas que influenciam o fenômeno da ET_0 (radiação solar global, temperatura do ar, umidade do ar e vento).

A simplificação dos métodos pode ter acarretado uma perda de significado físico de suas equações, principalmente para aqueles que excluíram a umidade relativa do ar e a radiação solar global de suas formulações.

Ficou evidenciada a importância da avaliação dos métodos empíricos de estimativa da ET_0 antes de sua aplicação, bem como a influência das variáveis meteorológicas consideradas em suas equações no fenômeno da ET_0 em âmbito regional.

Como recomendações, sugere-se a avaliação de outros métodos que tenham uma menor exigência de dados em relação ao FAO56 Penman-Monteith, bem como a formação de uma base de dados para o ajuste de métodos empíricos para a estimativa da ET_0 na região de estudo.

5 Referências

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. & Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration: *Guidelines for computing crop water requirements*. Rome, FAO. 301 p.
- Araújo, C.A.B. 2007. *Avaliação do perímetro irrigado Cruzeta (RN), através do uso intensivo de água para irrigação*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Dissertação de Mestrado, p.128.
- Borges, A.C. & Mediondo, E.M. 2007. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11(3):293-300.
- Camargo, A.P. 1971. *Balço hídrico no Estado de São Paulo*. 3.ed. Campina, IAC, 24 p. Boletim n.116.
- Cardoso, M.A.G. & Marcelino, B.C. 2005. Estimativa sazonal da evapotranspiração regional para o Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVI, João Pessoa, 2005. *Trabalho completo*, João Pessoa, SBRH, CD-ROOM.
- Carmo, R.L.; Ojima, A.L.R.O.; Ojima, R. & Nascimento, T.T. 2005. Água virtual: o Brasil como grande exportador de recursos hídricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16, João Pessoa, 2005. *Trabalho completo*, João Pessoa, SBRH, CD-ROOM.
- Camargo, A.P. & Sentelhas, P.C. 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5(1): 89-97.
- Carvalho, D.F.; Neto, D.H.O.; Ribeiro, R.L.D.; Guerra, J.G.M. & Rouws, J.R.C. 2011. Manejo da irrigação associada a coberturas mortas vegetais no cultivo orgânico da beterraba. *Engenharia Agrícola*, 31:269-277
- Christofidis, D. 2001. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo. *Revista Item*, 49:8-13.
- Hargreaves, G.H. & Samani, Z.A. 1982. Estimation of potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE*, 108(3):225-230.
- Hargreaves, G.H. & Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Journal of Applied Engineering in Agriculture*, 1(2):96-99.
- Mantovani, E.C. 1993. *Desarrollo y Evaluación de Modelos para el Manejo del Riego: Estimación de la Evapotranspiración y Efectos de la Uniformidad de Aplicación del Riego sobre la Producción de los Cultivos*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade de Córdoba, Tese de Doutorado, 40 p.
- Neto, D.H.O.; Carvalho, D.F.; Silva, L.D.B.; Guerra, J.G.M.; Ceddia, M.B. 2011. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da beterraba orgânica sob cobertura morta de leguminosa e gramínea. *Horticultura Brasileira*, 29(3):330-334
- Pereira, A.R.; Villa Nova, N.A. & Sediya, G.C. 1997. *Evapotranspiração*. Piracicaba, FEALQ. 183 p.
- Silva, D. & Barros Filho, J. 2003. *Estatística*. São Paulo, USP. (Apostila).
- Soares, A.K.; Ohnuma Jr, A.A.; Borges, A.C.; Pagnossi, A.A.; Angelotti Netto, A.; Corrêa Filho, C.R.R.; Brito, C.M.S.; Vela, F.J.; Lima, G.; Benini, R.M. & Mediondo, E.M. 2003. Análise do balanço hídrico serial na bacia da represa do Broa, SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15, Curitiba. *Trabalho completo*, Curitiba, ABRH, CD-ROOM.
- Souza, A.S.P. 2011. *Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para fins de manejo de irrigação*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, p.70.
- Tundisi, J.G. & Tundisi, T.M. 2005. *A água*. São Paulo, Publifolha. 120 p.
- Vepraskas, M.J.; Huffman, R.L. & Kreiser, G.S. 2006. Hydrologic models for altered landscapes. *Geoderma*, 131(3):287-298.
- Willmott, C.J.; Rowe, C.M. & Mintz, Y. 1985. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. *Journal of Climatology*, 5:589-606.