

Estimativa da evapotranspiração de referência em uma região do Alto Pantanal

Leandro Henrique Jung, Guilherme Augusto Biscaro, Gabriel Queiroz de Oliveira,
Mirian Analy Alves, Graziane Maria Giacon

Universidade Federal da Grande Dourados, Rodovia Dourados, Itahum, s/n, km 12, CEP 79.804-970, Dourados, MS, Brasil. E-mails: leandro_jung@yahoo.com.br, guilhermebiscaro@ufgd.edu.br, gabrielqo@hotmail.com, miriananaly@hotmail.com, graziane_giacon@hotmail.com

Resumo: O método de estimativa de evapotranspiração de referência (ET_o) com maior precisão é o de Penman-Monteith, que necessita muitos dados climáticos. Contudo, os produtores rurais nem sempre dispõem desses dados, preconizando a utilização de métodos mais simples. Neste trabalho, objetivou-se avaliar o desempenho de alguns métodos empíricos de estimativa de ET_o, no período seco e chuvoso na região do Alto Pantanal do Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil. Foram utilizadas variáveis climáticas entre janeiro de 2008 a dezembro de 2011. As avaliações dos métodos consideraram os parâmetros da equação de regressão (a e b), o coeficiente de determinação (r^2), estimativa do erro padrão (EEP), o índice de concordância (d) e o índice de desempenho (c). Os modelos empíricos avaliados foram os métodos Benevides-Lopez, Hamon, Jensen-Haise, Linacre, Priestley-Taylor e Turc. Conclui-se que os melhores métodos empíricos da estimativa da ET_o independente do período avaliado, são os de Priestley-Taylor e Turc.

Palavras chave: Elementos climáticos, Irrigação, Penman-Monteith.

Estimation of reference evapotranspiration in “Alto Pantanal” region

Abstract: The method of estimation of reference evapotranspiration (ET_o) with more accurately is the Penman-Monteith, which needs many climate data. However, farmers do not always have such data, recommending the use of simpler methods. This study aimed to evaluate the performance of some empirical methods of ET_o estimation in the dry and rainy period in “Alto Pantanal” region of Mato Grosso do Sul State, Brazil. Climatic variables were used from January 2008 to December 2011. Evaluations of methods considered the parameters of the regression equation (a and b), the coefficient of determination (R^2), estimated standard error (ESE), the concordance index (d) and performance index (c). The empirical models evaluated were the methods Benevides-Lopez, Hamon, Jensen-Haise, Linacre, Priestley-Taylor and Turc. It is concluded that the best empirical methods for estimation of ET_o, regardless of the period of evaluation, are Priestley-Taylor and Turc.

Keywords: Climatic elements, Irrigation, Penman-Monteith.

Introdução

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em diferentes regiões é muito importante, pois sua quantificação, pode auxiliar pesquisadores e profissionais na execução de projetos agrícolas e ambientais visando a maximização e sustentabilidade de uma região. O município de Aquidauana-MS encontra-se em região de transição de *Cerrado-Pantanal*, no qual apresenta grande potencial para agricultura irrigada, principalmente, culturas frutíferas e olerícolas, que em geral, para expressar seu máximo potencial produtivo, necessitam de água em momentos oportunos ao longo do seu desenvolvimento, preconizando assim a utilização de manejos de irrigação baseados no clima, principalmente por propiciar facilidade ao agricultor.

De acordo com Viana e Azevedo (2003), o aumento da evapotranspiração está relacionado com o acréscimo do saldo de radiação, efeito advectivo, temperatura do ar e velocidade do vento, como também, com o decréscimo da umidade relativa do ar. Vescove e Turco (2005), relataram que para estimar quanto de água está sendo perdido pela ET_o, é necessário utilizar métodos que permitam determinar essas perdas que serão repostas via irrigação, caso as chuvas não sejam suficientes. Como os métodos frequentemente utilizados para estimar o requerimento de água das culturas se baseiam em dados climáticos é necessário obter informações meteorológicas regionais para a estimativa da ET_o e conseqüentemente, melhorar o aproveitamento da água oriunda das precipitações pluviais e otimizar o dimensionamento de sistema de irrigação se necessário (Oliveira et al., 2005).

Conforme Lima, Silva e Oliveira (2001) existem várias dificuldades na obtenção de dados de parâmetros naturais, por isso, deve-se sempre que possível, efetuar a comparação entre dados medidos e simulados, através de modelos matemáticos, como forma de se buscar um método de avaliação que represente da melhor forma possível, o que ocorre na natureza, com possibilidades de simular panoramas futuros através de modelagem, o que é fundamental, principalmente no que se refere à gestão dos recursos hídricos.

Existem vários modelos para se estimar a ET_o, os quais utilizam dados meteorológicos e agrônômicos. Dentre eles, se destaca o modelo

de Penman-Monteith, por apresentar o melhor desempenho quando aplicado em diversos tipos de clima, sendo por isso recomendado pela FAO como padrão para a estimativa da ET_o e calibração de modelos empíricos (Allen et al., 1998).

Camargo e Camargo (2000) destacaram que o modelo de Penman-Monteith-FAO, prediz com eficácia a ET_o em diversas condições de umidade atmosférica, necessitando, entretanto, de vários elementos meteorológicos que nem sempre se encontram disponíveis em algumas regiões. Por isso, é importante, antes de se eleger o modelo a ser utilizado para a estimativa da ET_o, saber quais os elementos climáticos disponíveis e, a partir daí, verificar quais modelos podem ser aplicados, uma vez que a utilização dos diferentes métodos para determinado local de interesse fica na dependência dessas variáveis (Araújo, Costa & Santos, 2007). Em uma abordagem do fato histórico e atualizada sobre os estudos de ET_o, Carvalho et al. (2011), mostraram os resultados e esforços de vários pesquisadores no mundo e no Brasil, indicando a importância de identificar através de comparação com o método de Penman-Monteith-FAO, metodologias empíricas, a qual, deva ser mais ajustada para cada região.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho dos métodos empíricos de estimativa da ET_o: Benevides-Lopez, Hamon, Jesen-Haise, Linacre, Priestley-Taylor e Turc, comparando com o método de Penman-Monteith FAO-56, em período seco e chuvoso em uma região do Alto Pantanal do Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil.

Material e métodos

Para realização do trabalho, utilizaram-se dados meteorológicos obtidos entre o período de 01 de janeiro de 2008 e 31 dezembro de 2011 da estação meteorológica automática situada no município de Aquidauana-MS pertencente a rede de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil [INMET], com coordenadas geográficas 20° 20' Sul, 55° 48' Oeste e altitude de 155 m, no qual seu território possui características do bioma de Cerrado e Pantanal. O clima da região é classificado, como clima tropical quente sub-úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno e precipitação pluviométrica anual média

de 1200 mm. O período chuvoso se estende de outubro a março; entre abril e setembro, tem-se o período seco; com os menores índices de precipitação ocorrendo em julho a agosto. Os elementos climáticos coletados, em períodos

diários, foram à temperatura máxima e mínima do ar e do ponto de orvalho, umidade relativa máxima e mínima, velocidade do vento a 2 m de altura e radiação solar global (Tabela 1).

Tabela 1 - Temperatura do ar máxima (Tmax) e mínima (Tmin), temperatura do ponto de orvalho máxima (Tdmax) e mínima (Tdmin), umidade relativa do ar máxima (Urmax) e mínima (Urmin), velocidade do vento a 2m de altura (U2) e radiação solar global (Rs), entre janeiro de 2008 e dezembro de 2011, no Alto Pantanal-MS, Brasil.

Mês	Tmax	Tmin	Tdmax	Tdmin	Urmax	Urmin	U ₂	Rs
	°C				%		m s ⁻¹	MJ m ⁻² dia ⁻¹
JAN	32,33	22,69	24,75	20,01	93,35	55,84	1,47	21,94
FEV	33,32	23,09	24,79	20,05	92,78	52,92	1,41	23,65
MAR	33,61	22,25	24,42	19,09	92,92	48,95	1,22	23,33
ABR	32,74	19,37	22,06	15,57	91,31	43,13	1,25	20,09
MAI	28,91	16,31	19,75	13,50	93,11	48,68	1,26	16,67
JUN	28,21	15,11	18,98	12,39	91,97	46,53	1,24	14,18
JUL	29,91	15,15	18,26	10,58	88,27	38,61	1,36	17,18
AGO	31,76	16,01	17,98	10,27	83,89	33,97	1,50	17,28
SET	32,10	18,57	18,83	11,91	79,81	37,26	1,93	19,37
OUT	33,06	20,72	22,22	16,37	88,48	44,48	1,65	20,38
NOV	33,56	21,59	23,85	17,66	90,98	47,52	1,58	23,23
DEZ	33,99	22,96	24,20	18,74	90,14	49,62	1,55	25,66
Média	31,96	19,48	21,67	15,51	89,75	45,63	1,45	20,25

Foram avaliados os valores diários da estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), em mm dia⁻¹, para os períodos seco e chuvoso, utilizando-se métodos empíricos e o de Penman-Monteith-FAO, o qual serviu de modelo de comparação:

I Método de Penman-Montheith FAO-56 (PM)

Considera a resistência estomática de 70 s m⁻¹, a altura da grama fixada em 0,12 m e albedo de 23%, cuja estimativa se dá utilizando a Equação 1 (Allen et al., 1998):

$$ET_{o(PM)} = \frac{0,408 \Delta(Rn - G) + \gamma \left(\frac{900 U_2}{T + 273} \right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

em que:

ET_{o(PM)} - evapotranspiração de referência pelo método PM, mm dia⁻¹;

Rn - Saldo de radiação, MJ m⁻² dia⁻¹;

G - fluxo de calor no solo, MJ m⁻² dia⁻¹;

Δ - declinação da curva de saturação do vapor da água, kPa °C⁻¹;

U₂ - velocidade média do vento a 2 m acima da superfície do solo, m s⁻¹;

T - temperatura média do ar, °C;

e_s - pressão de saturação de vapor, kPa;

e_a - pressão atual de vapor, kPa;

γ - constante psicrométrica, kPa °C⁻¹.

II Método de Benevides-Lopez (BL)

Utilizado na estimativa da ET_o, baseando-se na temperatura média mensal e na umidade relativa do ar, podendo ser obtida pela Equação 2.

$$ET_{o(BL)} = 1,21 \cdot 10^{\left(\frac{1,8 T}{273 + T} \right)} (1 - 0,01 UR) + 0,21 T - 2,30 \quad (2)$$

em que:

ET_{o(BL)} - evapotranspiração de referência segundo o método BL, mm dia⁻¹;

T - temperatura média do ar, °C;

UR - umidade relativa do ar, %.

III Método de Hamon (H)

O método de Hamon (1961) para estimativa de ETo é descrito conforme a equação 3.

$$ET_{o(H)} = 0,55 \left(\frac{N}{12} \right)^2 \left(\frac{4,95 \exp^{0,062T}}{100} \right) 25,4 \quad (3)$$

em que:

$ET_{o(H)}$ - é a evapotranspiração de referência segundo H, mm dia⁻¹;

N - insolação teórico do ano (4380 h);

T - temperatura média do ar, °C.

IV Método de Jensen-Haise (JH)

Para regiões áridas e semiáridas, Jensen e Haise (1963) apresentaram Equação 4 para o cálculo da evapotranspiração de referência.

$$ET_{o(JH)} = R_s(0,025T + 0,08) \quad (4)$$

em que:

$ET_{o(JH)}$ - evapotranspiração de referência segundo método JH, mm dia⁻¹;

T - temperatura média do ar, °C;

R_s - radiação solar global expresso em equivalente de evaporação de água, mm dia⁻¹.

V Método de Linacre (L)

A ETo pode ser obtida em função da altitude, latitude e das temperaturas diárias máxima, mínima e do ponto de orvalho, por meio da Equação 5 (Linacre, 1977). Essa equação foi desenvolvida usando-se conjuntos de dados da África e da América do Sul. Para as condições brasileiras, esta equação deve ser usada com reservas, pois não existem estudos que substanciem esta proposição (Pereira, Villa Nova & Sediya, 1997).

$$ET_{o(L)} = \left\{ \left[500 \left(\frac{T + 0,006z}{100 - \varphi} \right) \right] + 15 \left(\frac{T - T_d}{80 - T} \right) \right\} \quad (5)$$

em que:

$ET_{o(L)}$ - evapotranspiração de referência segundo LI, mm dia⁻¹;

φ - latitude local em módulo (graus);

z - a altitude local, m;

T - temperatura média do ar, °C;

T_d - temperatura média do ponto de orvalho, °C.

VI Método de Priestley-Taylor (PT)

Utilizado na estimativa da ETo, constitui-se numa aproximação do método de Penman. Nesta equação, permanece apenas o saldo de radiação corrigido por um coeficiente empírico, conhecido como parâmetro de Priestley e Taylor, o qual

incorpora a energia adicional ao processo de evapotranspiração proveniente do termo aerodinâmico. Priestley e Taylor (1972) mostraram que este coeficiente apresenta média de 1,26 em condições mínimas de advecção regional, sendo a ETo obtida pela Equação 6.

$$ET_{o(PT)} = \alpha \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n - G) \quad (6)$$

em que:

$ET_{o(PT)}$ - evapotranspiração de referência conforme PT, mm dia⁻¹;

α - parâmetro de Priestley-Taylor (1,26);

R_n - saldo de radiação expresso em equivalente de evaporação de água, mm dia⁻¹;

G - Fluxo de calor do solo, mm dia⁻¹.

VII Método de Turc (T)

O método de Turc (1961) foi desenvolvido para o Oeste Europeu, onde a umidade relativa do ar é maior que 50%, e tem sido aplicado em diferentes regiões do planeta (Equação 7).

$$ET_{o(T)} = a_t 0,013 \left(\frac{T}{T + 15} \right) (R_s 41,867982 + 50) \quad (7)$$

a_t - tem como base a umidade relativa do ar (UR), sendo descrita nas condições das Equações 8 e 9.

$$a_t = 1 + \left(\frac{50 - UR}{70} \right), \text{ se } UR < 50 \quad (8)$$

$$a_t = 1, \text{ se } UR \geq 50 \quad (9)$$

em que,

$ET_{o(T)}$ - evapotranspiração de referência conforme T, mm dia⁻¹;

R_s - radiação solar global expresso em equivalente de evaporação de água, mm dia⁻¹;

T - temperatura média do ar, °C;

at - coeficiente de ajuste.

Os valores estimados da ETo diária para cada um dos seis métodos foram comparados com os valores de ETo obtidos pelo método Penman-Monteith (FAO-56). Foram determinados e considerados os coeficiente linear (a) e angular (b) do modelo de regressão linear, coeficiente de determinação (r^2), correlação (r), o erro de estimativa padrão (EEP) (Equação 10). Para a avaliação da exatidão dos métodos avaliados,

foram determinados o índice de concordância (d) de Willmott (1981), no qual é calculado conforme a Equação (11) e pelo índice de desempenho (c), que corresponde ao produto do coeficiente de correlação (r) pelo índice de concordância (d) (Camargo & Sentelhas, 1997).

$$EEP = \sqrt{\frac{\sum(O_i - P_i)^2}{n-1}} \quad (10)$$

em que,

O_i - valores estimados pelo método padrão, Penman-Monteith, mm dia^{-1} ;

P_i - corresponde aos valores estimados pelos métodos, mm dia^{-1} .

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (11)$$

em que:

O - é a média de evapotranspiração de referência estimada pelo método padrão, mm dia^{-1} .

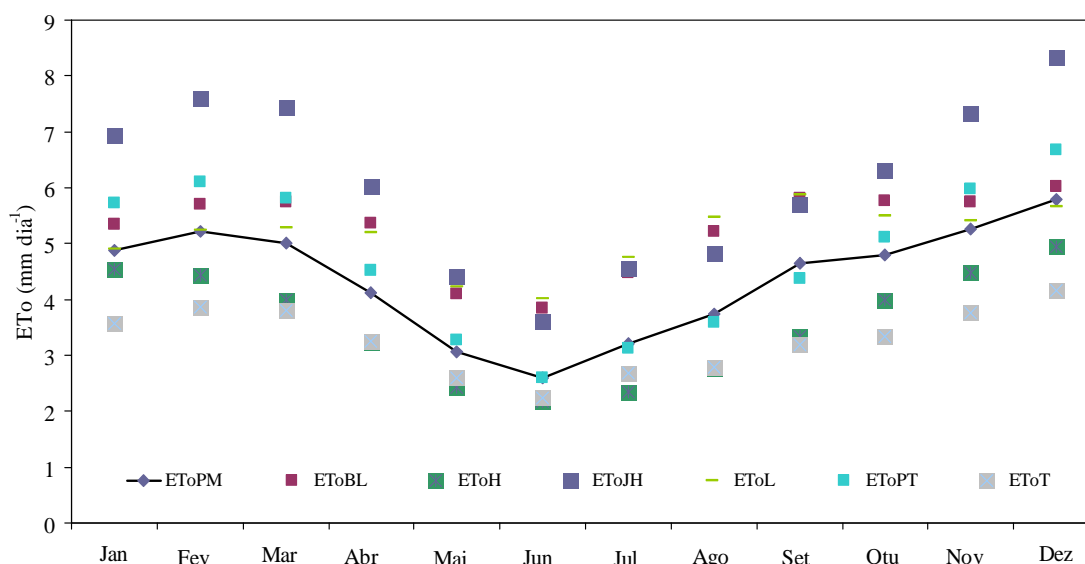
O índice de desempenho "c" é interpretado e distribuído nas seguintes classes: péssimo, $c < 0,40$; mau, $0,41 < c < 0,50$; sofrível,

$0,51 < c < 0,60$; mediano, $0,61 < c < 0,65$; bom, $0,66 < c < 0,75$; muito bom, $0,76 < c < 0,85$; e ótimo, $c > 0,85$, sendo que, a indicação dos métodos de estimativa da ETo para a região de Aquidauana-MS, foram segundo os critérios propostos por Camargo e Sentelhas (1997), sendo aos métodos superiores a "c" de 0,65.

Resultados e discussão

Na Figura 1, encontra-se o comportamento médio mensal ao longo do ano, dos modelos de ETo comparados ao padrão-FAO (EToPM), no município de Aquidauana-MS, no qual pode-se observar um comportamento sazonal semelhante entre os modelos testados e o padrão-FAO. Constatou-se uma tendência de superestimava da ETo pelo método de Jensen-Haise, Linacre e Benevides-Lopez ao longo do ano e subestimativa pelo método de Hamon e Turc. Foi verificado também que entre os meses de maio a agosto, a média da ETo do método de Priestley-Taylor é bastante próximo do método de Penman-Monteith (Figura 1).

Figura 1 – Gráfico dos valores médios mensais da evapotranspiração de referência (ETo) determinada pelos métodos Penman-Monteith (PM), Benevides-Lopez (BL), Hamon (H), Jesen-Haise (JH), Linacre (L), Priestley-Taylor (PT), e Turc (T).



Observou-se que a maior ETo média estimada pelo método de Penman-Monteith foi de $5,80 \text{ mm dia}^{-1}$, encontrada no mês de dezembro, pois neste mês houve altas temperaturas e maior

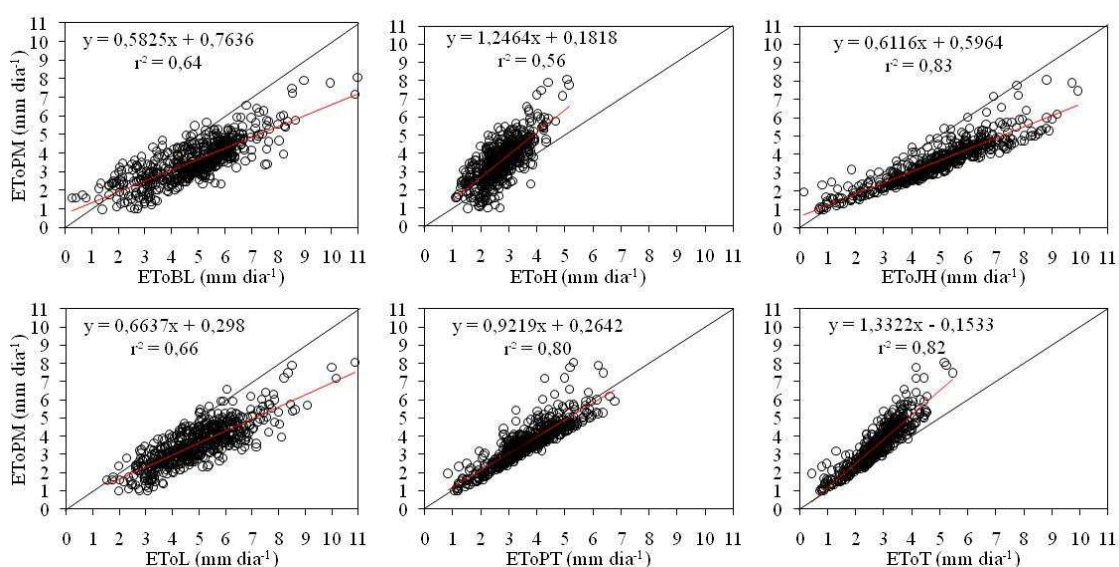
radiação solar (Figura 1). Contudo, em estudo realizado por Rodrigues e Fernandes (2011) em Aquidauana-MS, utilizando uma série de dados de 2007 a 2009, foi verificado que usando o

mesmo método, a maior ETo média foi encontrada no mês de setembro (9,50 mm dia⁻¹).

Nas Figuras 2 estão apresentadas as correlações dos valores médios da ETo, em mm

dia⁻¹, correspondente ao período seco, estimados pelo método de Penman-Monteith em relação aos métodos de Benevides-Lopes, Hamom, Jesen-Haise, Linacre, Priestley-Taylor, e Turc.

Figura 2 – Gráficos de correlação entre o método de Penman-Monteith (EToPM) e os métodos empíricos: Benevides-Lopez (EToBL), Hamon (EToH), Jesen-Haise (EToJH), Linacre (EToL), Priestley-Taylor (EToPT), e Turc (EToT), no período seco.



No período seco, observa-se que coeficiente angular dos modelos de regressão para a estimativa de ETo com Benevides-Lopez, Jensen-Haise, Linacre estão superestimando a ETo em 41,7%, 38,8% e 33,6%, no qual suas precisões estão na ordem de 64%, 83% e 66% respectivamente. Já os métodos de Hamon e Turc para esse mesmo período subestimaram em 24,6% e 33,2% o método de Penman-Monteith, sendo que o método de Turc foi mais preciso que Hamon, talvez por utilizar a radiação solar como elemento de entrada na equação, que por sua vez diminui a dispersão dos dados. Na Bacia do rio Jacupiranga no Estado de São Paulo, Borges e Mendiondo (2007), verificaram que a equação de Hamon subestima a ETo em 27,9%, com precisão de 94,8%, tanto no período seco como no chuvoso.

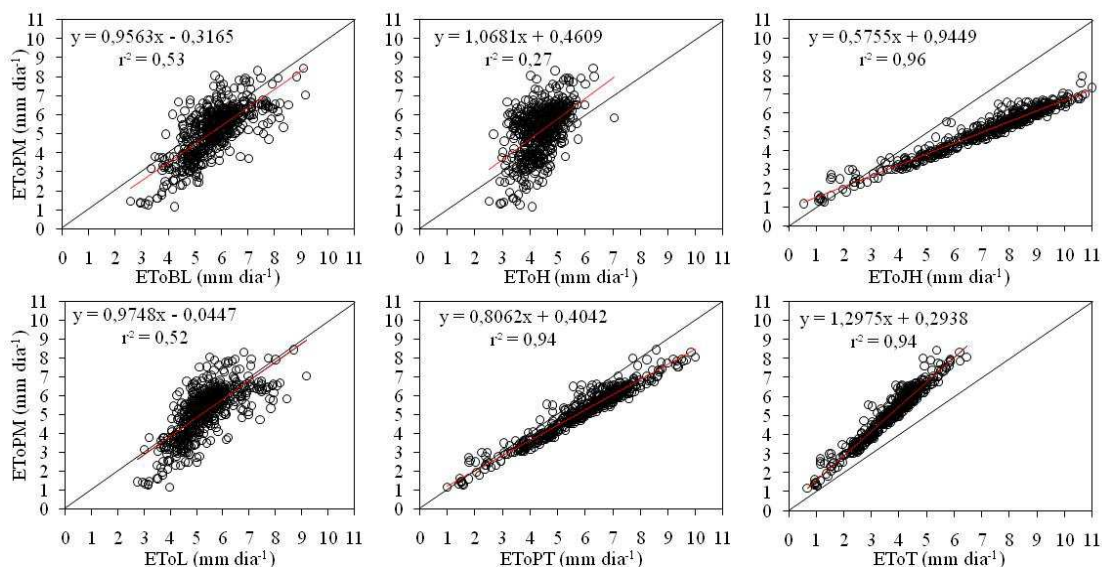
O método empírico que mais aproximou-se do Penman-Monteith, foi o de Priestley-Taylor, onde observa-se na Figura 2, que sua precisão foi de 80%, subestimando a ETo em apenas 7,8%.

Esse método é utilizado em vários estudos, sendo que necessita do saldo de radiação para seu cálculo, o que fornece em condições de variações de energia no ambiente, vantagem em relação aos outros métodos, principalmente por esse método ser uma derivação do método de Penman-Monteith, não exigindo dados de velocidade do vento e umidade relativa do ar (Magalhães & Cunha, 2012).

Diante desses resultados, fica claro que os métodos empíricos que utilizam radiação solar, são mais adequados para a estimativa da ETo no período seco na região de Aquidauana-MS.

O método de Hamon no período chuvoso apresentou o menor valor de r² (0,27), talvez pelo fato que os elementos de entrada na base da equação ser somente a insolação teórica e a temperatura do ar (Figura 3). Como na região durante o período chuvoso, há grande frequência de nebulosidade, a insolação teórica induz a erros na estimativa da ETo.

Figura 3 – Gráficos de correlação dos entre o método de Penman-Monteith (EToPM) e os métodos empíricos: Benevides-Lopez (EToBL), Hamon (EToH), Jesen-Haise (EToJH), Linacre (EToL), Priestley-Taylor (EToPT), e Turc (EToT), em período chuvoso.



Segundo Tazzo et al. (2012), a estimativa da ETo através de modelos que utilizam variáveis de insolação e temperatura do ar, são menos precisos do que os que possuem aporte de energia, no entanto as variáveis de energia possuem maior dificuldade para sua obtenção, por serem mais caras e não estarem presentes em todos postos meteorológicos.

Conceição e Mandelli (2005) avaliaram a adequabilidade de métodos que empregam a temperatura do ar e radiação solar como variáveis de entrada comparando-os aos valores diários estimados pelo método padrão-FAO para a região de Bento Gonçalves-RS e, observaram que os melhores resultados obtidos foram com os métodos que empregam a radiação global incidente como variável.

Verifica-se na Figura 3, que os métodos de Benevides-Lopez, Hamon e Linacre apresentaram coeficientes angulares próximos a um, o que de certa forma indica que sua relação a uma certa amplitude estão mais próximos, porém esses métodos apresentaram baixa precisão com r^2 abaixo de 55%. Isso reforça que somente a adoção do r^2 como critério de definição da qualidade de métodos não é adequado, uma vez que esse método não estabelece o tipo e a magnitude das diferenças entre um valor padrão e um valor previsto por modelos de estimativa ou outros mecanismos de medida diferentes do padrão (Barros et al. 2009).

O “ r e r^2 ” expressão uma medida da precisão do modelo; o índice de concordância (d) expressa uma medida de exatidão e o índice de desempenho “ c ”, representa o desempenho conjunto do modelo, por isso é considerado um indicador de confiança, sendo esses os critérios de indicação do método de ETo a ser utilizado nos períodos avaliados na região de Aquidauana-MS.

Encontra-se na Tabela 2, os indicadores de avaliação dos métodos Benevides-Lopez, Hamon, Jensen-Haise, Linacre, Priestley-Taylor e Turc em comparação ao Penman-Monteith, no período seco e chuvoso. A análise prévia dos métodos permitiu identificar que o método de Priestley-Taylor, obteve os melhores resultados de estimativa de erro padrão (EEP), sendo na ordem 0,52 e 0,82 mm dia⁻¹, mostrando que no período seco foi o menor que no período chuvoso.

O modelo de Penman-Monteith obteve média de 3,56 e 5,16 mm dia⁻¹ no período seco e chuvoso respectivamente. Com relação ao ajuste dos valores estimados pelos modelos empíricos em relação aos observados pelo método padrão (Penman-Monteith) no período seco, os indicadores estatísticos mostraram que o método de Priestley-Taylor com coeficiente de correlação (r) de 0,89, índice de concordância (d) de 0,94 e “ c ” de 0,84, foi classificado como “Muito bom”. Quanto ao EEP foi verificado que o menor valor foi encontrado com Priestley-Taylor no período

seco, na ordem de $0,52 \text{ mm dia}^{-1}$, no qual a diferença entre a média de ETo em relação ao Penman-Monteith foi de apenas $0,02 \text{ mm dia}^{-1}$. Neste período foi verificado que os métodos de Jensen-Haise ($c = 0,68$) e Turc ($c = 0,71$) obtiveram classificação segundo Camargo e Sentelhas (1997) como “Bom” e Benevides-Lopez ($c = 0,56$), Linacre ($c = 0,55$), classificado como “Sofrível” e neste período (seco) o método Hamon classificado como “Mau” ($c = 0,48$). Portanto os métodos Benevides-Lopez, Hamon e Linacre durante o período seco na região de Aquidauana-MS são desaconselháveis, tendo em vista os baixos desempenhos observados por meio dos indicadores de exatidão.

Em várias cidades de Mato Grosso do Sul, Magalhães e Cunha (2012), estudando as performances de ETo estimados pelos métodos de Jensen-Haise, Linacre e Priestley-Taylor utilizando o software Sevap, verificaram que os mesmos apresentaram classificação de Mau, Péssimo e Muito Bom respectivamente. Oliveira et al. (2011), avaliando o método de Linacre em Aquidauana-MS, para períodos médios de 1, 3, 7 e 15 dias, verificaram que em todos os períodos este método apresenta baixa exatidão com “c” abaixo de 0,53 e destacaram que existe tendência em diminuir a exatidão com aumento médio dos dias.

Tabela 2 - Média da evapotranspiração de referência (ETo, mm dia^{-1}), erro de estimativa padrão (EEP, mm dia^{-1}), coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), coeficiente de determinação (r^2), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d), índice de desempenho (c) e classificação do desempenho dos métodos no período seco e chuvoso.

Métodos*	ETo	EEP	r	d	c	Classificação**
Período seco						
PM	3,56	-	-	-	-	-
BL	4,81	1,56	0,80	0,70	0,56	Sofrível
H	2,71	1,15	0,75	0,64	0,48	Mau
JH	4,85	1,52	0,91	0,75	0,68	Bom
L	4,92	1,58	0,81	0,67	0,55	Sofrível
PT	3,58	0,52	0,89	0,94	0,84	Muito bom
T	2,79	0,94	0,91	0,78	0,71	Bom
Período chuvoso						
PM	5,16	-	-	-	-	-
BL	5,72	1,06	0,73	0,77	0,56	Sofrível
H	4,40	1,35	0,52	0,49	0,26	Péssimo
JH	7,32	2,37	0,98	0,67	0,65	Mediano
L	5,33	0,92	0,72	0,81	0,58	Sofrível
PT	5,89	0,86	0,97	0,91	0,88	Ótimo
T	3,75	1,47	0,97	0,69	0,67	Bom

*PM = Penman-Monteith, BL = Benevides-Lopez, H = Hamom, JH = Jensen-Haise, L = Linacre, PT = Priestley-Taylor, T = Turc. ** Camargo e Sentelhas (1997).

Na análise dos resultados obtidos no período chuvoso (Tabela 2) entres os anos de 2008 a 2011, o melhor desempenho foi para o método Priestley-Taylor ($c = 0,88$) classificado como “Ótimo”, com EEP igual a $0,86 \text{ mm dia}^{-1}$ e “d” de 0,91. Sendo assim, este método não apresenta restrição de uso para as condições climáticas do local onde se realizou o estudo.

Verifica-se que o método Linacre no período chuvoso apresentou valor médio de ETo de $5,33 \text{ mm dia}^{-1}$, superestimando em apenas $0,17 \text{ mm dia}^{-1}$ o método Penman-Monteith e, EEP de $0,92 \text{ mm dia}^{-1}$, contudo os indicadores de precisão e exatidão contribuíram para o baixo desempenho ($c = 0,58$), classificado como “Sofrível”.

O método de Benevides-Lopez, também foi classificado como sofrível ($c = 0,56$), apresentando EEP de $1,06 \text{ mm dia}^{-1}$. Na Tabela 2, verifica-se que o método de Jensen-Haise encontrou a maior média de ETo e EEP no período chuvoso ($7,32 \text{ mm dia}^{-1}$ e $2,37 \text{ mm dia}^{-1}$), embora seus indicadores de avaliação do método tenham maximizado seu ajuste, principalmente ao elevado "r", que foi de 98%, que juntamente com o "d" (0,67) propiciou o índice de desempenho de 0,65. A menor ETo no período chuvoso foi encontrado pelo método de Turc, sendo na ordem de $3,75 \text{ mm dia}^{-1}$ e, classificado como "Bom" (Tabela 2).

O método que apresentou o menor índice de desempenho foi o Hamon ($c = 0,26$). Talvez devido ao fato que as constantes da equação devem ser ajustadas ao período chuvoso, principalmente pelo fato da insolação do período ser irregular, apresentando grandes variações com alternâncias de céu nublado e limpo.

De maneira geral, entre os métodos avaliados, o método Priestley-Taylor apresentou leve redução nos indicadores estatísticos, no período seco em relação aos obtidos no período chuvoso, mostrando que na região de Aquidauana-MS, existe pouca sensibilidade desse método às mudanças nas condições climáticas, podendo ser aplicado em todas as condições. Pereira et al. (2009) verificaram que na região da Serra da Mantiqueira o método de Priestley-Taylor mostrou-se bastante sensível as mudanças nas condições climáticas, pois este depende fundamentalmente da radiação solar, a qual sofre redução de acordo com a estação de verão (período chuvoso) para a de inverno (período seco). Na investigação de Cavalcante et al. (2011), verificaram que em Mossoró-RN, tanto o período de seco como o chuvoso, o método de Priestley-Taylor, quando comparado com o método padrão-FAO, não obteve índice de desempenho satisfatório para ser recomendado, classificado como "Mau" e "Mediano", respectivamente nos períodos.

Conclusões

Na região do Alto Pantanal do Estado de Mato Grosso do Sul, os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) que utilizam a radiação solar, apresentam os melhores desempenhos em relação aos que não utilizam.

Para a estimativa da ETo, recomenda-se os métodos de Priestley-Taylor e Turc, independentemente da época do ano.

Os métodos de ETo de Benevides-Lopez, Hamon e Linacre não apresentam precisão necessária para seu uso na região de Alto Pantanal.

Referências

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements* (FAO. Irrigation and drainage paper, n.56, 301p). Rome: FAO.
- Araújo, W. F., Costa, S. A. A., & Santos, A. E. (2007). Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) para Boa Vista, RR. *Caatinga*, 20 (4), 84-88.
- Barros, V. R., Souza, A. P., Fonseca, D. C. E., & Silva, L. B. D. (2009). Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 4 (2), 198-203.
- Borges, A. C., & Mendiondo, 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., & Camargo, M. B. P. (2000). Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, 59 (2), 125-137.
- Camargo, A. P., & Sentelhas, P. C. (1997). Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5 (1), 89-97.
- Carvalho, L. G., Rios, G. F. A., Miranda, W. L., & Castro Neto, P. (2011). Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 41 (3), 456-465.
- Cavalcante Jr., E.G., Oliveira, A.D., Almeida, B. M., & Espínola Sobrinho, J. (2011). Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência

- para as condições do semiárido Nordeste. *Semina: Ciências Agrárias*, 32 (supl. 1), 1699-1708.
- Conceição, M. A. F., & Mandelli, F. (2005). Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 13 (2), 303-307.
- Hamon, W. R. (1961). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, 87 (3), 107- 120.
- Jensen, M. E., & Haise, H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of Irrigation Drainage Division*, ASCE, 89, (1), 15-41.
- Lima, J. E. F. W., Silva, C. L., & Oliveira, C. A. S. (2001). Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia hidrográfica em condições naturais de cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 5 (1), 33-41.
- Linacre, E. T. (1977). A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*, 18, 409-424.
- Magalhães, F. F., & Cunha, F. F. (2012). Desempenho do software SEVAP na estimativa da evapotranspiração no Estado de Mato Grosso do Sul. *Agrarian*, 5 (16), 151-160.
- Oliveira, G. Q., Lopes, A. S., Jung, L. H., Nagel, P. L., & Bertoli, D. M. (2011). Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência baseadas na temperatura do ar, em Aquidauana-MS. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 5 (3), 224-234.
- Oliveira, R. Z., Oliveira, L. F. C., Wehr, T. R., Borges, L. B., & Bonomo, R. (2005). Comparação de metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Goiânia, GO. *Bioscience Journal*, 21 (3), 9-27.
- Pereira, A. R., Villa Nova, N. A., & Sedyama, G. C. (1997). *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ, 183p.,
- Pereira, D. R., Yanagi, S. N. M., Mello, C. R., Silva, A.M., & Silva, L.A. (2009). Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. *Ciência Rural*, 39 (9), 2488-2493.
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100 (1), 81-92.
- Rodrigues, C. C. B., & Fernandes, S. D. (2011, abril). Comparação de metodologias de estimativa de evapotranspiração de referência para Aquidauana e Corumbá, Mato Grosso do Sul. *Anais do Encontro Sul-Brasileiro de Meteorologia*. Pelotas, RS, Brasil, 4.
- Tazzo, I. F., Heldwein, A. B., Maldaner, I. C., Pivetta, C. R., Streck, L., & Righi, E. Z. (2012). Evapotranspiração do pimentão em estufa plástica estimada com dados meteorológicos externos, na primavera. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16 (3), 275–280.
- Turc, L. (1961), Evaluation des besoins en eau d'irrigation: évapotranspiration potentielle. *Annuaire Agronomique*, 12 (1), 13-49.
- Viana, T. V. A., & Azevedo, B. M. (2003). *Meteorologia e climatologia agrícolas* (169p). Fortaleza: UFC.
- Vescove, H. V., & Turco, J. E. P. (2005). Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara-SP. *Engenharia Agrícola*, 25 (3), 713-721.
- Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 184-194.

Recebido em: 13/04/2015

Aceito em: 07/07/2016