

ESTIMATIVAS DA RADIAÇÃO GLOBAL E ERROS NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELO MÉTODO DE PENMAN-MONTHEIT FAO 56

Mattheus Frederico Back Koelln¹; Charles Campoe Martim²; Brena Geliane Ferneda¹; Janaina da Silva Schimitt¹; Adilson Pacheco de Souza³

¹ Graduando em Engenharia Agrícola e Ambiental, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, UFMT, Campus, Sinop, Av. Alexandre Ferronato 1200, Distrito Industrial, Cep: 78557-267, Sinop, MT, Brasil.

² Bolsista do Programa Jovens Talentos para a Ciência/CAPES, Graduando em Engenharia Agrícola e Ambiental, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, UFMT, Campus de Sinop.

³ Professor Adjunto, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, UFMT, Sinop – MT. E-mail: adilsonpacheco@ufmt.br

Apresentado no
XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014
27 a 31 de julho de 2014 – Campo Grande - MS

RESUMO: Objetivou-se avaliar os erros gerados na evapotranspiração de referência (ET_o) obtida pelo método de Penman-Montheit, pelo emprego de três alternativas para obtenção da radiação solar global, em agrupamentos mensais, sazonais e anuais, para Sinop (11,85° S; 55,56° W, 371m de altitude), Mato Grosso, no período de 01/2012 a 12/2013. A radiação solar global (H_G) foi medida por um piranometro CS300 e estimada pelo método de Angstrom-Prescott com duas variações: i) FAO 56 (a = 0,29 cos Φ; b = 0,52); ii) coeficientes calibrados regionalmente para os agrupamentos de dados supracitados. Na avaliação do desempenho estatístico foram empregados os indicativos ERM (erro relativo médio), RQEM (raiz quadrada do erro quadrático médio), índice de ajustamento (d) e o índice de desempenho (c). As médias anuais de H_G medida e estimada foram de 19,09; 19,89 e 18,60 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente, enquanto que, as médias anuais de ET_o foram de 4,06; 4,28 e 3,92 mm dia⁻¹, com valores máximos diários de 7,02; 6,68 e 5,67 mm dia⁻¹. Apenas em dezembro, janeiro e fevereiro, as melhores estimativas foram obtidas pela FAO 56, sendo que o emprego de regressões lineares permitiu melhorias no desempenho estatístico, independentemente do agrupamento de dados e época do ano.

PALAVRAS-CHAVES: manejo de irrigação, razão de insolação, indicativos estatísticos

ESTIMATES OF GLOBAL RADIATION AND ERRORS IN EVAPOTRANSPIRATION REFERENCE OBTAINED BY PENMAN-MONTHEIT FAO 56

ABSTRACT: Evaluated the errors generated in the reference evapotranspiration (ET_o) obtained by the Penman-Montheit FAO 56 by employing three alternatives for obtaining global radiation, in monthly, seasonal and annual databases groupings, for the Sinop (11.85° S; 55.56° W; 371m asl), Mato Grosso State, Brazil, in the period from 01 /2012 to 12/ 2013. The global solar radiation (H_G) was measured by a pyranometer CS300 and estimated by the method of Angstrom-Prescott with two variations: i) FAO 56 (a = 0.29 cos Φ; b = 0.52), ii) regionally calibrated coefficients for groups above data. In evaluating the statistical performance were employed indicative ERM (mean relative error), RQEM (square root of the mean squared error), index adjustment (d) and the performance index (c). The average annual H_G measured and estimated were 19.09, 19.89 and 18.60 MJ m⁻² day⁻¹, respectively, while the average annual ET_o were 4.06, 4.28 and 3,92 mm day⁻¹, with daily maximum values of 7.02, 6.68 and 5.67 mm day⁻¹. Only in December, January and February, the best estimates were produced by FAO 56 and the use of linear regressions allowed improvements in statistical performance, regardless of the databases groupings and time of year.

KEYWORDS: irrigation management, sunshine ratio, statistical indicative

INTRODUÇÃO

Considerada a componente mais ativa do ciclo hidrológico e também o principal componente no balanço de água em sistemas hidro-agrícolas, a evapotranspiração (ET) é um elemento importante em estudos de avaliação ambiental, manejo de bacias hidrográficas e na estimativa da necessidade hídrica das culturas, sendo, portanto, fundamental no projeto e manejo de sistemas de irrigação. Por conseguinte, sofre variações em função das condições climáticas e, em função de sua grande influência no balanço hidrológico, pequenos erros em sua estimativa podem representar volumes expressivos de água em uma região (ALLEN et al., 2011).

A evapotranspiração de referência (ET_o) é tipicamente medida empregando-se técnicas e princípios físicos relativamente complexos, sendo o balanço de água no solo utilizando lisímetros, a forma direta mais precisa. No entanto, em virtude das limitações associadas ao método, o uso de modelos físico-matemáticos torna-se uma alternativa para a sua obtenção da ET_o. A partir de resultados de inúmeros estudos conduzidos nas últimas décadas, a equação combinada de Penman-Monteith modificada por ALLEN et al. (1998) (PM) é a que melhor representa os fatores físicos e fisiológicos que regem o processo da evapotranspiração. A maior desvantagem desta equação é o grande número de parâmetros meteorológicos necessários para a sua aplicação, ainda mais que muitas estações meteorológicas não possuem todos os sensores necessários e mesmo quando presentes, a qualidade dos dados fornecidos é muitas vezes baixa (DROOGERS & ALLEN, 2002). Este fato é ainda normalmente observado nos países em desenvolvimento, nos quais conjuntos confiáveis de dados de radiação, umidade relativa do ar e velocidade do vento são limitados (TRAJKOVIC & KOLAKOVIC, 2009).

Em função da grande dificuldade de obtenção de dados de radiação solar para aplicações agropecuárias, vários métodos de preenchimento de dados tem sido desenvolvidos e aplicados em práticas hidrológicas nas últimas décadas. Essa técnica tem proporcionado resultados aceitáveis de estimativa da ET_o pelo método PM com dados mínimos (SENTELHAS et al., 2010; ROCHA et al., 2011), apesar de ainda pouco utilizada no Brasil.

De acordo com Liu et al. (2009), informações confiáveis de evapotranspiração (ET) são essenciais em estudos relacionados à hidrologia, ao clima e ao manejo dos recursos hídricos; no entanto, segundo os autores, há poucas informações comparativas entre os coeficientes de Angström-Prescott calibrados localmente e aqueles recomendados pela FAO, e seus efeitos na estimativa da radiação solar global e, conseqüentemente, na evapotranspiração de referência (ET_o).

Objetivou-se avaliar os erros na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman-Montheit decorrentes da estimativa da radiação global com base na razão de insolação (método de Angstrom-Prescott) por meio de calibrações regionais e propostas da FAO, para a região de Sinop, Norte do Estado de Mato Grosso.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Campus da Universidade Federal de Mato Grosso em Sinop, Mato Grosso, (11,98° S, 55,56° W e altitude 371m), entre janeiro de 2012 e dezembro de 2013. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo tropical quente e úmido (Aw), caracterizado pela presença de duas estações bem definidas: uma chuvosa (entre outubro e abril) e seca (de maio a setembro), com pequena amplitude térmica anual, com médias mensais variando entre 23,5° C e 25,5° C e máximas inferiores a 36 °C (setembro e outubro). Em média ocorrem 1974 mm ano⁻¹, sendo acima de 50% entre os meses de dezembro e fevereiro e cerca de 1% ocorrem historicamente, entre junho e agosto (SOUZA et al., 2013).

A estação meteorológica apresenta os seguintes sensores: radiação solar global (piranômetro CS300) a 1,0 e 2,0 m de altura, radiação PAR (Licor) a 2,0m de altura, velocidade e direção do vento (anemômetro, 03002-L RM YOUNG) a 10 m de altura, psicrômetro com abrigo termométrico (Vaisala, mod. CS 215) a 2,0m de altura e pluviógrafo (TE 525) a 1,50m de altura. Todos esses sensores estão conectados a um sistema de aquisição de dados CR 1000 da Campbell Scientific programado para armazenamento de valores médios ou integrados em cinco minutos.

Os dados foram agrupados em sua totalidade (anual) e posteriormente separados em agrupamentos sazonais (estações do ano) e mensais, sendo que os dados obtidos em 2012 foram empregados na geração dos coeficientes de Angstrom-Prescott e os demais nas correlações entre ETo estimada.

Procedeu-se o cálculo da ETo diária utilizando o modelo Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998) (Equação 1), tendo como referência a radiação global medida para obtenção do balanço de ondas curtas (BOC). Tal modelo foi ainda utilizado sob forma alternativa de cálculo da radiação solar (Rs), pelo emprego do modelo de Angstrom-Prescott, considerando: i) calibrações regionais em diferentes agrupamentos de dados; ii) $a = 0,52$; $b = 0,29 \cos \varphi$ (Allen et al., 1998).

$$E_{To} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (01)$$

onde R_n = radiação líquida na superfície da planta ($MJ m^{-2} dia^{-1}$); G = densidade de fluxo de calor no solo ($MJ m^{-2} dia^{-1}$); T = temperatura média do ar a 2 metros de altura ($^{\circ}C$); u_2 = velocidade do vento a 2 metros de altura ($m s^{-1}$); e_s = pressão de saturação de vapor (kPa), obtida pela média entre $e^{\circ}(T_{max})$ e $e^{\circ}(T_{min})$; e_a = pressão atual de vapor (kPa); Δ = declividade da curva de pressão de vapor ($kPa ^{\circ}C^{-1}$); γ = constante psicrométrica ($kPa ^{\circ}C^{-1}$); e $0,408$ = fator de conversão para o termo $(R_n - G)$, de $MJ m^{-2} dia^{-1}$ para $mm dia^{-1}$.

$$H_G = \left[a + b \left(\frac{n}{N} \right) \right] H_0 \quad (02)$$

Em que: H_G = radiação global diária ($MJ m^{-2} dia^{-1}$); H_0 = radiação extraterrestre diária ($MJ m^{-2} dia^{-1}$); "n" e "N" são a insolação e fotoperíodo, respectivamente (horas); "a" e "b" são coeficiente de ajuste;

A obtenção da radiação no topo da atmosfera diária foi dada pela integração entre o nascer e o pôr-do-sol dos valores da radiação incidente no topo da atmosfera na partição horária (H_0), que por sua vez, foi estimada pela equação 01 (IQBAL, 1983).

$$H_0^h = I_{sc} E_0 [\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega_s] \quad (03)$$

em que: I_{sc} é a constante solar ($4921 kJ m^{-2} h^{-1}$); E_0 é a fator de correção da excentricidade da órbita da Terra (adimensional), dado pela equação 02 proposta por Spencer (1971); δ é a declinação solar, em graus (eq. 04); φ é a latitude local, em graus; ω_s é o ângulo horário solar, em graus, que é formado pelo ângulo (medido no pólo celeste) entre o plano de meridiano do observador e o meridiano do Sol, valendo 0° ao meio-dia (Tempo Solar Verdadeiro) e com variação de 15° por hora, decorrentes da velocidade angular média da Terra (IQBAL, 1983).

$$E_0 = 1,000110 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,001280 \sin \Gamma + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma \quad (04)$$

$$\text{sendo: } \Gamma = 2\pi \frac{(DJ - 1)}{366} \quad (05)$$

$$\delta = 23,45 \text{sen} \left[\frac{360}{365} (DJ - 80) \right] \quad (06)$$

Algumas dessas variáveis podem ser medidas diretamente (como velocidade do vento e a temperatura), todavia as demais são estimadas com a descrição a seguir (Allen et al., 1998; Pereira et al., 1997).

$$s = \frac{4098 e_s}{(T + 273)^2} \quad (07)$$

$$e_s = 0,610810 \frac{7,5T}{237,5+T} \quad (08)$$

$$e_a = e_s \times UR/100 \quad (09)$$

$$\lambda = 2,501 - 0,002361 T \quad (10)$$

$$\gamma = 0,001628(P/\lambda) \quad (11)$$

$$\gamma^* = \gamma(1 + 0,33U_2) \quad (12)$$

Na estimativa do saldo de radiação (Rn), empregou-se também, estimativas de outras componentes da radiação solar, como a radiação incidente no topo da atmosfera e a radiação de ondas longas, permitindo, conseqüentemente a verificação do balanço de radiação diário, dado pela equação abaixo:

$$Rn = BOC + BOL \quad (13)$$

em que: R_{ns} = saldo de radiação de ondas curtas (MJ m⁻² dia⁻¹); BOC = saldo de radiação de ondas curtas (MJ m⁻² dia⁻¹); BOL = saldo de radiação de ondas longas (MJ m⁻² dia⁻¹). Nesse caso, considerou-se um coeficiente de reflexão do gramado de 0,23 e variou-se as formas de obtenção da radiação global.

O saldo de radiação de ondas longas (BOL) considera a radiação térmica da vegetação e do solo para a atmosfera, bem como a refletida da atmosfera e da nuvem e foi estimado pela equação abaixo.

$$BOL = \left(0,9 \times \frac{n}{N} + 0,1\right) \times \left(0,34 - 0,14 \times \sqrt{e_d}\right) \times \sigma \times \left(T_{kx}^4 + T_{kn}^4\right) \times \frac{1}{2} \quad (14)$$

em que: σ = constante de Stefan-Boltzmann [4,903 x 10⁻⁹ MJ m² K⁻⁴ d⁻¹]; T_{kx} = temperatura máxima diária [K]; e, T_{kn} = temperatura mínima diária [K].

Para avaliação do desempenho estatístico das estimativas foram utilizados os seguintes indicativos estatísticos: i) erro relativo médio (MBE – means bias error), a raiz quadrada do quadrado médio do erro (RMSE – root means square error), índice de ajustamento (d) e o índice de desempenho (c), sendo este último indicativo obtido pelo produto entre o coeficiente de correlação (r) e o índice de ajustamento (SOUZA et al., 2011).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad (15)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P'_i + O'_i)^2} \quad (17)$$

em que: P_i – valores estimados; O_i – valores medidos; N – número de observações; |P'_i| - valor absoluto da diferença P_i – O_i; |O'_i| - valor absoluto da diferença O_i – \bar{O} .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados das estimativas mensais e sazonais dos coeficientes “a” e “b” de Angström-PreScott, tendo-se encontrado, para todas as análises, coeficientes de determinação acima de 0,60, com piores ajustes nos meses com grande variação de nebulosidade e elevadas precipitações pluviais (fevereiro). Os valores médios mensais de “a” variaram de 0,2608 (fevereiro) a 0,3413 (julho) e os valores médios mensais de “b” variaram de 0,2860 (janeiro) a 0,4494 (março); os menores valores de “a” e “b” compreendem a época do período chuvoso, momento em que a transmissividade da atmosfera é maior em virtude da redução da concentração de partículas suspensas (BLANCO & SENTELHAS, 2002; DORNELLAS et al., 2006; CARVALHO et al., 2011).

Tabela 01. Coeficientes lineares e angulares da regressão [$H_G/H_0 = a + b (n/N)$] para diferentes agrupamentos de dados, para Sinop – MT (período de dados: 10/2010 a 12/2012).

| Período | Coeficiente linear (a) | Coeficiente angular (b) | Coeficiente de determinação (R ²) |
|-----------|------------------------|-------------------------|---|
| Jan | 0,2822 | 0,2860 | 0,7026 |
| Fev | 0,2608 | 0,4111 | 0,6058 |
| Mar | 0,2790 | 0,4494 | 0,7719 |
| Abr | 0,2812 | 0,4339 | 0,7473 |
| Mai | 0,3089 | 0,4113 | 0,8822 |
| Jun | 0,3184 | 0,4252 | 0,7117 |
| Jul | 0,3413 | 0,4134 | 0,6941 |
| Ago | 0,3363 | 0,4152 | 0,7405 |
| Set | 0,3027 | 0,4316 | 0,7852 |
| Out | 0,2988 | 0,4277 | 0,8355 |
| Nov | 0,2815 | 0,4463 | 0,7784 |
| Dez | 0,2826 | 0,4104 | 0,6968 |
| VERÃO | 0,2731 | 0,402 | 0,6745 |
| OUTONO | 0,2858 | 0,4396 | 0,8386 |
| INVERNO | 0,2547 | 0,5066 | 0,8334 |
| PRIMAVERA | 0,2848 | 0,4418 | 0,7951 |
| ANUAL | 0,2679 | 0,4726 | 0,8627 |

Observa-se que os valores médios mensais de H_G medido variaram de 15,38 a 22,45 MJ m⁻² dia⁻¹, com aumento da incidência entre outono e inverno (Tabela 2). Os meses com elevada variabilidade da nebulosidade apresentaram os maiores desvios. Ambas as formas de obtenção de H_G empregado os coeficientes de Angstrom-PreScott (CAP) apresentaram boas estimativas da radiação global, contudo, a calibração regional permitiu, resultados semelhantes às medidas principalmente na estação seca, período crítico para o manejo dos sistemas de irrigação na região.

Tabela 2. Valores médios mensais da radiação global medida e estimada (MJ m⁻² dia⁻¹) pelo método de Angstrom-PreScott, para Sinop-MT.

| Meses | Radiação Global medida | | | | Radiação Global estimada CAP calibrados | | | | Radiação Global estimada CAP FAO | | | |
|-------|------------------------|------|--------|--------|---|------|--------|--------|----------------------------------|------|--------|--------|
| | Média | DP | Máximo | Mínimo | Média | DP | Máximo | Mínimo | Média | DP | Máximo | Mínimo |
| Jan | 15,38 | 4,91 | 24,45 | 6,08 | 14,21 | 2,55 | 20,35 | 11,28 | 16,66 | 4,64 | 27,84 | 11,34 |
| Fev | 18,39 | 5,56 | 28,59 | 5,45 | 17,10 | 4,52 | 25,49 | 10,25 | 19,81 | 5,72 | 30,40 | 11,15 |
| Mar | 18,39 | 4,65 | 26,68 | 2,73 | 17,86 | 4,27 | 25,40 | 9,98 | 19,20 | 4,93 | 27,91 | 10,15 |
| Abr | 15,12 | 3,90 | 21,56 | 0,17 | 16,39 | 3,70 | 22,46 | 8,96 | 17,84 | 4,41 | 25,02 | 9,04 |
| Mai | 18,68 | 2,76 | 22,18 | 9,12 | 18,44 | 4,10 | 23,26 | 8,88 | 19,90 | 5,06 | 25,71 | 8,16 |
| Jun | 19,61 | 3,51 | 27,50 | 10,99 | 18,55 | 1,82 | 20,66 | 12,45 | 19,70 | 2,24 | 22,29 | 12,23 |
| Jul | 20,13 | 1,60 | 22,85 | 15,32 | 20,35 | 1,37 | 22,34 | 15,85 | 21,35 | 1,68 | 23,67 | 15,67 |
| Ago | 22,45 | 1,53 | 24,29 | 16,90 | 22,36 | 1,09 | 24,32 | 18,56 | 23,54 | 1,31 | 25,80 | 18,91 |
| Set | 20,36 | 3,68 | 26,55 | 8,71 | 18,90 | 3,09 | 24,43 | 10,56 | 18,90 | 3,09 | 24,43 | 10,56 |
| Out | 20,86 | 3,59 | 26,32 | 12,06 | 20,56 | 3,41 | 26,28 | 13,32 | 20,56 | 3,41 | 26,28 | 13,32 |
| Nov | 16,86 | 4,44 | 26,60 | 6,69 | 17,33 | 4,02 | 26,91 | 11,20 | 18,43 | 4,68 | 29,60 | 11,30 |
| Dez | 19,84 | 4,68 | 27,06 | 7,31 | 18,49 | 3,80 | 24,99 | 11,28 | 20,46 | 4,81 | 28,70 | 11,33 |
| Anual | 18,84 | 3,73 | 28,59 | 16,90 | 18,38 | 3,14 | 26,91 | 18,56 | 19,70 | 3,83 | 30,40 | 18,91 |

Pela Tabela 3, nota que a ETo média mensal diária para a região de Sinop oscila entre 3,32 e 4,83 mm dia⁻¹, sendo que os maiores valores tendem a ocorrer no verão e outono. No inverno e primavera a amplitude entre valores mínimos e máximos é reduzida, em função da maior homogeneidade dos valores de H_G incidente. Em geral, observa-se que a calibração regional propiciou menores valores de ETo quando comparados com a proposta da FAO.

Tabela 3. Valores médios mensais da evapotranspiração de referência (ETo) (mm dia⁻¹) pelo método de Angstrom-Prescott, para Sinop-MT.

| Meses | ETo (H _G medida) | | | | ETo (H _G estimada CAP calibrado) | | | | ETo (H _G estimada CAP FAO) | | | |
|-------|-----------------------------|------|--------|--------|---|------|--------|--------|---------------------------------------|------|--------|--------|
| | Média | DP | Máximo | Mínimo | Média | DP | Máximo | Mínimo | Média | DP | Máximo | Mínimo |
| Jan | 3,77 | 1,20 | 6,20 | 1,084 | 3,42 | 0,36 | 4,31 | 2,95 | 4,13 | 0,96 | 6,46 | 2,97 |
| Fev | 4,31 | 1,23 | 6,16 | 0,43 | 3,94 | 0,80 | 5,34 | 2,67 | 4,72 | 1,15 | 6,70 | 2,93 |
| Mar | 4,39 | 1,09 | 7,02 | 1,88 | 4,16 | 0,78 | 5,75 | 2,75 | 4,55 | 0,97 | 6,48 | 2,80 |
| Abr | 3,84 | 1,02 | 5,66 | 1,60 | 3,80 | 0,70 | 5,01 | 2,14 | 4,16 | 0,87 | 5,68 | 2,18 |
| Mai | 4,83 | 1,55 | 7,89 | 0,88 | 4,56 | 1,55 | 7,92 | 2,45 | 4,75 | 1,49 | 7,95 | 2,24 |
| Jun | 3,68 | 0,91 | 5,91 | 2,11 | 3,37 | 0,20 | 3,68 | 2,73 | 3,70 | 0,29 | 4,08 | 2,67 |
| Jul | 3,32 | 0,29 | 4,44 | 2,72 | 3,38 | 0,19 | 3,88 | 2,95 | 3,49 | 0,32 | 4,44 | 2,72 |
| Ago | 3,85 | 0,36 | 4,64 | 2,70 | 3,82 | 0,27 | 4,72 | 3,41 | 4,16 | 0,27 | 5,08 | 3,56 |
| Set | 4,36 | 0,64 | 5,81 | 2,20 | 3,94 | 0,71 | 5,13 | 2,73 | 4,62 | 0,84 | 6,20 | 2,77 |
| Out | 4,83 | 0,72 | 6,07 | 2,77 | 4,75 | 0,61 | 5,76 | 3,44 | 5,14 | 0,81 | 6,50 | 3,38 |
| Nov | 4,05 | 0,95 | 5,97 | 1,73 | 4,18 | 0,77 | 6,06 | 3,01 | 4,49 | 0,96 | 6,83 | 3,04 |
| Dez | 4,73 | 1,00 | 6,22 | 1,88 | 4,35 | 0,70 | 5,59 | 3,00 | 4,91 | 0,99 | 6,66 | 3,01 |
| Anual | 4,16 | 0,92 | 7,89 | 2,77 | 3,97 | 0,64 | 7,92 | 3,44 | 4,40 | 0,83 | 7,95 | 3,56 |

A Figura 1 mostra as correlações entre os valores de ETo nas diferentes formas de obtenção de H_G. Esse comportamento linear foi semelhante em todas as épocas do ano, enquanto que os coeficientes de determinação foram superiores a 0,5624. Os maiores espalhamentos para essas correlações foram observados nos meses de verão.

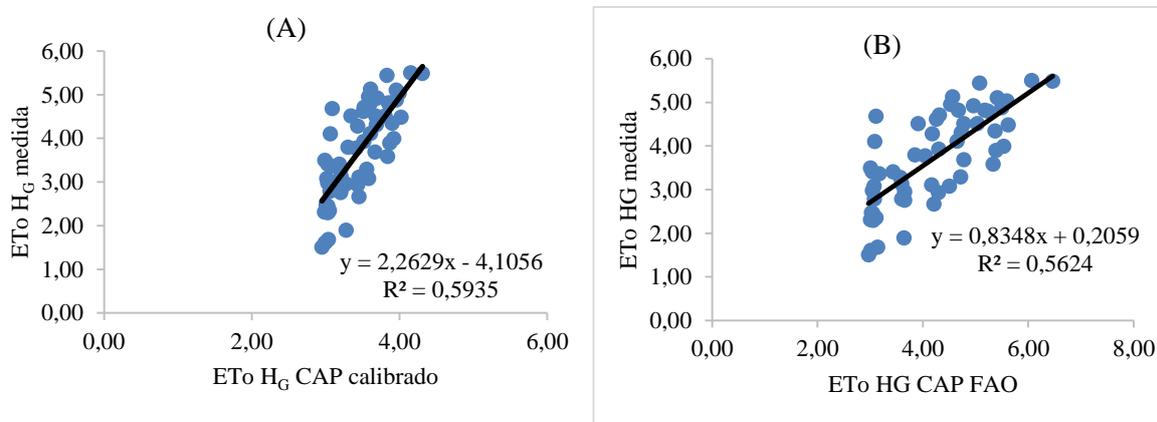


Figura 1. Correlações entre a ETo por Penman-Montheit obtida com radiação global medida e estimada, para o mês de janeiro, na região de Sinop-MT.

Segundo SOUZA et al. (2011), a utilização conjunta dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e índice de ajustamento “d”, permite uma alternativa adequada para avaliação do desempenho estatístico de modelos de estimativa, com análises simultâneas dos desvios da média, identificando a ocorrência de sub ou superestimativa, espalhamento e ajustamento do modelo em relação aos valores medidos. Por conseguinte, o indicativo MBE representa o desvio das médias e provê informações quanto à desempenho do modelo a longo prazo, com valores negativos indicando subestimativa e vice-versa. Quanto menor o valor absoluto de MBE melhor é a performance do modelo testado (STONE, 1993), porém uma superestimativa cancela uma subestimativa.

Nesse contexto, o emprego da radiação global com base na proposta da FAO (Allen et al., 1998) permitiu a ocorrência de subestimativas da ETo ao longo do ano, com exceção de maio, todavia, foram inferiores a 0,45 mm dia⁻¹, com espalhamentos inferiores a 1,45 mm dia⁻¹ e ajustamentos superiores a

0,50. Independentemente da época do ano, a calibração regional dos coeficientes lineares e angulares para obtenção de H_G permitiram menores erros na estimativa da ETo.

Tabela 4. Indicativos estatísticos das estimativas da ETo por diferentes formas de obtenção de H_G , para a região de Sinop-MT.

| Meses | ETo (H_G estimada CAP calibrado) | | | ETo (H_G estimada CAP FAO) | | |
|-------|-------------------------------------|------------------------------|--------|-------------------------------|------------------------------|--------|
| | MBE (mm dia ⁻¹) | RMSE (mm dia ⁻¹) | d | MBE (mm dia ⁻¹) | RMSE (mm dia ⁻¹) | d |
| Jan | 0,34 | 1,09 | 0,5469 | -0,36 | 1,13 | 0,6965 |
| Fev | 0,37 | 0,98 | 0,7601 | -0,40 | 1,05 | 0,7903 |
| Mar | 0,17 | 1,30 | 0,5053 | -0,22 | 1,41 | 0,4946 |
| Abr | 0,04 | 0,97 | 0,6406 | -0,31 | 1,12 | 0,6237 |
| Mai | 0,27 | 1,16 | 0,8497 | 0,08 | 1,29 | 0,7983 |
| Jun | 0,30 | 0,91 | 0,5084 | -0,03 | 0,87 | 0,5143 |
| Jul | -0,06 | 0,29 | 0,5689 | -0,17 | 0,30 | 0,7686 |
| Ago | 0,02 | 0,32 | 0,6955 | -0,31 | 0,45 | 0,5860 |
| Set | 0,42 | 0,96 | 0,4855 | -0,26 | 1,01 | 0,4918 |
| Out | 0,09 | 0,46 | 0,8667 | -0,30 | 0,60 | 0,8361 |
| Nov | -0,13 | 0,58 | 0,8752 | -0,45 | 0,75 | 0,8457 |
| Dez | 0,35 | 0,68 | 0,9074 | -0,21 | 0,60 | 0,9367 |

CONCLUSÕES

As estimativas de ETo apresentaram índice de desempenho ótimo, independente da metodologia utilizada na obtenção dos coeficientes da equação de Angström-Prezcott para o cálculo de H_G ; no entanto, a partir da análise de estimativas locais para o cálculo de H_G utilizando-se coeficientes médios mensais, observa-se que os resultados são mais satisfatórios em relação aos coeficientes propostos pela FAO.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper no. 56. FAO, Rome. 1998.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; HOWELL, T.A.; JENSEN, M.E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, v.98, p.899–920. 2011.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997.
- CARVALHO, D. F.; SILVA, D. G.; SOUZA, A. P.; GOMES, D. P.; ROCHA, H. S. Coeficientes da equação de Angström-Prezcott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.8, p.838-844, 2011.
- DORNELAS, K. D. S.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Coeficientes médios da equação de Angström-Prezcott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1213-1219, 2006.
- DROOGERS, P.; ALLEN, R.G. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. **Irrigation and Drainage System**, v.16, n.1, p.33–45, 2002.
- ROCHA, E.J.T.; EVANGELISTA, S.R.M.; FUCK JÚNIOR, S.C.F.; GONDIM, R.S. Estimativa da ETo pelo modelo Penman-Monteith FAO com dados mínimos integrada a um Sistema de Informação Geográfica. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.1, p.75-83, 2011.

SENTELHAS, P.C.; GILLESPIE, T.J.; SANTOS, E.A. Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, v.97, p.635–644, 2010.

SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa – Pesquisas Agrárias e Ambientais**, v.1, n.1, p.34-43, 2013.

SOUZA, A.P.; CARVALHO, D.F.; SILVA, L.B.D.; ALMEIDA, F.T.; ROCHA, H.S. Estimativas da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.3, p.219-228, mar., 2011.

STONE, R.J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v.51, p.289-291, 1993.

TRAJKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. Estimating Reference Evapotranspiration Using Limited Weather Data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.135, p.443-449, 2009.