

Determinação da ET de referência pela razão de Bowen com psicrômetros instalados a diferentes alturas¹

Determination of reference evapotranspiration by the Bowen Ratio Method using psychrometers installed at various heights

Gilberto Barbosa Cardoso², Thales Vinícius de Araújo Viana³, Benito Moreira de Azevedo⁴, Valdemício Ferreira de Sousa⁵ e Francisco de Souza⁶

RESUMO

Visando contribuir para um adequado uso dos recursos hídricos, o presente trabalho teve por objetivo comparar estimativas diárias da evapotranspiração de referência (ET_o) obtidas pela razão de Bowen, sob diferentes alturas dos psicrômetros, com as obtidas pelo método FAO-56 Penman-Monteith. O experimento foi conduzido em Fortaleza, CE, na área instrumental da estação meteorológica da UFC, coberta com grama americana (*Bouteloua americana* (L) Scribin). A área foi irrigada através de mangueiras gotejadoras e a quantidade de água a ser repostada foi estimada a partir da curva característica do solo. O acompanhamento das condições hídricas do solo foi realizado através de tensiômetros. Coletaram-se os valores das variáveis meteorológicas através de uma estação meteorológica automatizada e de um sistema razão de Bowen (SRB), montando com psicrômetros confeccionados com termopares de cobre-constantan. Visando se analisar os possíveis efeitos de diferentes alturas/distâncias dos psicrômetros instalados alterou-se a posição dos braços do SRB, em quatro diferentes períodos de coleta de dados. As estimativas da ET_o foram calculadas em planilhas Excel e a análise do desempenho dos métodos foi realizada através dos coeficientes de correlação, do índice de Wilmott e do índice “c”. Concluiu-se com os trabalhos experimentais que: as posições dos braços do sistema razão de Bowen apresentam grande influência sobre o desempenho da metodologia nas estimativas da evapotranspiração de referência.

Termos para indexação: consumo hídrico, balanço de energia, sistemas automáticos.

ABSTRACT

Meaning to contribute for an adequate use of water resources, this study aimed to compare daily forecasts of reference evapotranspirations (ET_o), obtained through the Bowen ratio method with psychrometers set at various heights, to those obtained by the FAO-56 Penman-Monteith method. The trials were carried out in Fortaleza, Ceará State, Brazil at the Meteorology Experimental Station of Universidade Federal do Ceará, covered with American grass (*Bouteloua americana* (L) Scribin). The area was irrigated with the help of dripping hoses and the amount of water to be replaced was estimated according to soil moisture characteristics. Soil moisture conditions were evaluated with tensiometers. The values of the variables related to the weather were collected in an automated weather station plus the Bowen Ration System (BRS), which was set up with psychrometers made up with thermocouples of copper-constantan. Aiming to analyze the likely effects of the various heights/lengths ratios of the psychrometers installed, the BRS arms positions were altered, in four different periods of data collection. The values of ET_o were calculated with an MS-Excel spreadsheet, and the reliability of the methodology was evaluated by the correlation coefficients between the Wilmott index and the c-index. The experimental studies have lead to the conclusion that the arms position of the Bowen ratio system greatly affects the reliability of the method used to estimate the reference evapotranspiration.

Index terms: water use, energy balance, automated systems.

¹ Recebido para publicação em:13/04/2004.

Aprovado em:16/11/2004.

Parte da Dissertação apresentada pelo primeiro autor ao Curso de Mestrado de Irrigação e Drenagem da UFC

² Eng. Agrônomo, Mestre em Irrigação e Drenagem, UFC.

³ Professor Adjunto (Dr.) do Departamento de Engenharia Agrícola/UFC. e-mail: thales@ufc.br.

⁴ Professor Adjunto (Dr.) do Departamento de Engenharia Agrícola/UFC. e-mail: benito@ufc.br.

⁵ Pesquisador Doutor da EMBRAPA-Meio Norte.

⁶ Professor Titular (Ph.D., Aposentado) do Departamento de Engenharia Agrícola da UFC.

Introdução

As atividades agrícolas são as maiores demandantes por água, necessitando por isso de um empenho redobrado dos pesquisadores no desenvolvimento de pesquisas que possibilitem a economia de água. Uma das alternativas para racionalizar o uso da água em projetos agrícolas é estimar a evapotranspiração da cultura (ET_c) a partir da evapotranspiração de referência (ET_o) e do coeficiente de cultura (K_c).

A ET_o pode ser obtida por medidas diretas ou por estimativas. As medidas diretas feitas em lisímetros em geral são de alto custo limitando o seu uso na propriedade agrícola. Existem vários métodos de estimativa da ET_o que podem ser divididos de acordo com os princípios envolvidos em cinco categorias: empíricos, aerodinâmico, balanço de energia, combinados e correlação de turbilhões. Alguns dos métodos são adaptados a determinadas condições locais onde foram desenvolvidos, tendo o seu uso limitado em maior escala. Outros, em função do seu embasamento técnico-científico, como é o caso do método de Penman-Monteith, são adotados universalmente (Pereira et al., 1997).

Um outro método bastante utilizado para a estimativa da ET_o é balanço de energia com a razão de Bowen. Esse método representa a contabilidade das interações dos diversos tipos de energia com a superfície, constituindo-se, basicamente, na partição do saldo de radiação nos fluxos de calor latente e nos fluxos de calor sensível no ar e no solo (Fontana, 1991). Esta metodologia já foi avaliada e recomendada por diferentes autores (Kroon, 1989; Moura e Martins, 1992; Steduto e Hsiao, 1998; Azevedo, 1998) a partir de sistemas automáticos de determinação da razão de Bowen. Entretanto, esses sistemas disponíveis comercialmente apresentam elevado custo, podendo ser substituídos por psicrômetros confeccionados a partir de termopares (Cunha, 1996; Alves e Pereira, 2000).

A obtenção de bons resultados com a razão de Bowen requer gradientes de temperatura e, principalmente, de vapor d'água. Tais condições, normalmente, são obtidas em áreas úmidas sob ventos com velocidades maiores do que 2,0 m.s⁻¹. Nestes casos, o valor da razão de Bowen tende a se aproximar de zero (Viana, 2001).

Perez et al. (1999) estudaram o descarte de valores inconsistentes da razão de Bowen, com sistema SRB (Campbell Scientific, Logan, Utah, USA), visando ao aprimoramento do referido método. Os autores relataram que os dados inconsistentes (valores absolutos superiores a 0,7) ocorreram, principalmente, no nascer e pôr-do-sol e à noite devido à inversão térmica. Um outro problema citado pelos autores foram os baixos gradientes de pressão de vapor (menores que 0,03 kPa.m⁻¹) originários de advecção reduzida, chuvas ou após irrigação. Os autores concluíram, ainda, que devem ser rejeitados os dados noturnos e obtidos após precipitação ou irrigação, e que a ocorrência de gradientes de vapor d'água muito pequenos afeta a consistência das estimativas pelo SRB.

O presente trabalho tem por objetivo analisar e comparar as estimativas diárias da ET_o obtidas pelo método da razão de Bowen, a partir de um sistema confeccionado com termopares instalados a diferentes alturas, com as obtidas pelo método de Penman-Monteith.

Material e Métodos

1. Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na área de coleta de dados da Estação Meteorológica do Departamento de Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, localizado em Fortaleza, CE (3°45'S de latitude, 38°33'W de longitude e 20 m de altitude). O clima é do tipo Aw', ou seja, tropical chuvoso, muito quente, com predomínio de chuvas nas estações do verão e do outono.

A cultura utilizada para a estimativa da ET_o foi a grama americana (*Bouteloua americana* (L) Scribin) numa área útil de 240 m² (12 m x 20 m), devidamente cercada. A bordadura apresentava uma extensão aproximada de 5 m, em cada lado do contorno da área útil.

Visando ao acompanhamento da umidade do solo e das necessidades hídricas da cultura instalaram-se, na área experimental, três baterias de tensiômetros, cada uma composta de três tensiômetros nas profundidades 0,10 m, 0,15 m e 0,30 m, com leituras diárias. A cultura era irrigada

manualmente através de mangueira, e a quantidade de água a ser reposta foi estimada a partir da curva característica do solo, com o controle da vazão sendo feito através de um hidrômetro.

Para a coleta de dados utilizou-se uma estação automática com sensores meteorológicos e sistemas de aquisição (modelo CR10X, da Campbell Scientific, Utah, USA) e de transmissão de dados via módulo de memória. Coletaram-se os dados meteorológicos em quatro períodos de 14 dias com o objetivo de avaliar os efeitos das alturas de instalação dos psicrômetros sobre a estimativa da ETo. Os períodos foram: de 23 de novembro a 06 de dezembro de 2001; de 09 de dezembro a 22 de dezembro de 2001; de 17 a 30 de janeiro de 2002; e de 06 a 19 de fevereiro de 2002.

Dados de radiação líquida, temperatura do ar, umidade atmosférica, velocidade do vento, fluxo de calor no solo e precipitação foram coletados a cada 10 segundos e armazenados os valores médios a cada 30 minutos. A evapotranspiração foi calculada a cada 30 minutos, por meio das metodologias da razão de Bowen e de Penman-Monteith, tendo o total diário correspondido ao somatório dos valores parciais.

2. Método da razão de Bowen

A estimativa da ETo pela metodologia do balanço de energia/razão de Bowen foi realizada seguindo os procedimentos sugeridos por Pereira et al. (1997). Para isso, construiu-se um SRB automático sobre a área gramada da estação meteorológica, constituindo-se de dois psicrômetros automatizados com termopares seco e úmido, de cobre-constantan, conectados a um sistema de aquisição de dados (Figura 1), sendo o termômetro úmido envolto em gaze embebida, conforme Cunha et al. (1996).

O método do balanço de energia constitui-se da partição do saldo de energia, geralmente, nos fluxos de calor latente de evapotranspiração, e sensível, no ar e no solo, segundo a equação 1.

$$R_n \cong LE + G + H \quad (1)$$

em que: R_n é o saldo de radiação; LE o fluxo de calor latente de evaporação; G o fluxo de calor no

solo e H o fluxo de calor sensível no ar, expressos em energia por unidade de área e de tempo.

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (2)$$

Combinando-se as equações 1 e 2 o fluxo de calor latente é então dado por:

$$LE = \frac{R_n - G}{(1 + \beta)} \quad (3)$$

Pelo denominador da equação 3, verifica-se uma indeterminação matemática à medida que β se aproxima de -1.

A razão de Bowen pode também ser calculada através da equação 4:

$$\beta = \gamma \cdot \frac{\Delta T}{\Delta e_a} \quad (4)$$

em que: γ é o coeficiente psicrométrico, em $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; ΔT , a diferença de temperatura do ar ($^\circ\text{C}$) entre duas alturas; Δe_a , a diferença de pressão do vapor d'água (kPa) entre duas alturas.

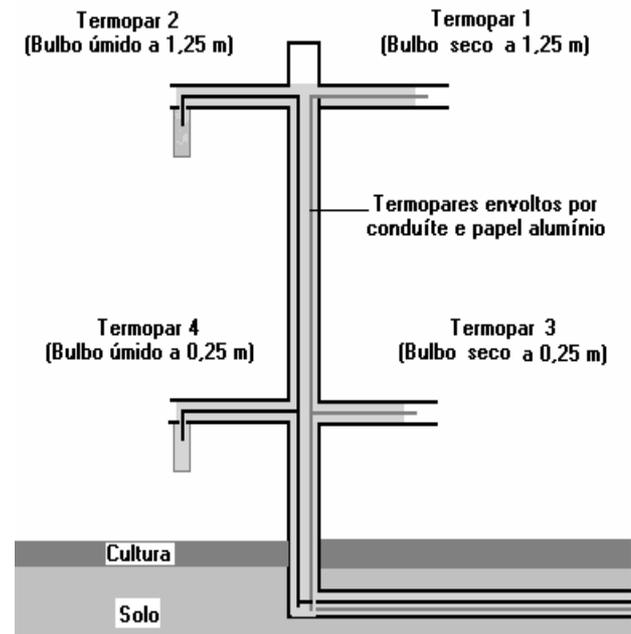


Figura 1 – Detalhe da posição dos psicrômetros instalados no centro da área experimental, durante o segundo período de coleta de dados.

Através do conjunto psicrométrico o Δe_a ($e_{a2} - e_{a1}$) pode ser assim determinado:

$$\Delta e_a = e_{su_2} - e_{su_1} - \gamma \cdot (T_{s_2} - T_{s_1}) + \gamma (T_{u_2} - T_{u_1}) \quad (5)$$

em que e_{su} é a pressão de saturação na temperatura do bulbo úmido, em kPa; T_s é a temperatura do bulbo seco, em °C; T_u é a temperatura do bulbo úmido, em °C e os subscritos 1 e 2 indicam as alturas de instalação dos sensores.

O desenvolvimento da equação 5, com substituição na equação 4 resulta, conforme Pereira et al. (1997), na equação 6:

$$\beta = \left(\frac{\Delta T_u}{(1 - W) \cdot \Delta T_s} - 1 \right)^{-1} \quad (6)$$

em que $W = \frac{s}{(s + \gamma)}$ é o fator de ponderação calculado pelas equações 11 e 12:

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

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

Através das equações expostas calculou-se a ETo através do SRB montado nos quatro períodos de coleta de dados meteorológicos já citados anteriormente. Em cada período variou-se à distância entre os braços dos psicrômetros automatizados, conforme Tabela 1.

3. Método FAO-56 Penman-Monteith

Para a estimativa da ETo pelo método de Penman-Monteith, a cada 30 minutos, utilizou-se

a equação FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998) a seguir

$$E_{To} = \frac{0,408 \cdot s \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{18,75}{T + 273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{s + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (9)$$

em que: ETo, é a evapotranspiração de referência, em mm.30min⁻¹; s, a inclinação da tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água, no ponto dado pela temperatura do ar, em kPa.°C⁻¹; Rn, a radiação líquida, em MJ.m⁻².30 min⁻¹; G, o fluxo de calor sensível no solo, em MJ.m⁻².30 min⁻¹; γ , o coeficiente psicrométrico, adotou-se 0,0626 kPa.°C⁻¹; U₂, a velocidade do vento a 2,0 m de altura, em m.s⁻¹; e_s, a pressão de saturação de vapor d'água, em kPa; e_a, a pressão atual do vapor d'água, em kPa. O coeficiente 18,75 ajusta a escala de tempo, visto que o valor original da equação, 900, é aplicado no cálculo da ETo em mm.d⁻¹.

O valor da inclinação da tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água, s, foi calculado pela equação 10:

$$s = \frac{4098e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (10)$$

em que: T é a temperatura média do ar, em °C. No cálculo da pressão de saturação de vapor d'água, e_s em kPa, utilizou-se a equação 11:

$$e_s = 0,6108 \cdot \exp \left[\frac{17,27 \cdot T}{T + 237,3} \right] \quad (11)$$

A pressão atual do vapor d'água, e_a em kPa, foi calculada pela equação 12:

$$e_a = \frac{e_s \cdot UR}{100} \quad (12)$$

em que: UR é a umidade relativa do ar, em %.

Tabela 1 - Período de utilização e alturas do braços superior e inferior (m).

Período de utilização	Altura do braço superior (m)	Altura do braço inferior (m)
de 23/11 a 06/12 de 2001	1,00	0,25
de 09 a 22/12 de 2001	1,25	0,25
de 17 a 30/01 de 2002	1,25	0,50
de 06 a 19/02 de 2002	1,50	0,50

4. Comparação entre os métodos

Os valores da ETo estimados pelo método da razão de Bowen foram comparados com os obtidos pelo método FAO-56 Penman-Monteith através do coeficiente de correlação (r), do índice de concordância de Wilmott (id) e do produto destes (c).

O coeficiente de correlação indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, ou seja, o erro aleatório; os seus valores variam de -1 a 1 e quanto mais próximo da unidade maior é a correlação entre os dados analisados.

O índice de concordância de Wilmott define a precisão dos valores estimados em relação aos observados. O seu valor varia de 0 a 1 , sendo a precisão maior quanto mais próximo de 1 é o índice. O índice de Wilmott é calculado através da seguinte equação:

$$id = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum \left[\left(P_i - \bar{O} \right) + \left(O_i - \bar{O} \right) \right]} \quad (13)$$

em que: P é a evapotranspiração estimada pelo método da razão de Bowen; O a evapotranspiração observada pelo método FAO Penman-Monteith; \bar{O} a evapotranspiração observada média (mm).

A avaliação do desempenho da metodologia da razão de Bowen foi realizada através do índice “ c ” proposto por Camargo e Sentelhas (1997), a partir do coeficiente de correlação e do índice de Wilmott, como se segue:

$$c = r \cdot id \quad (14)$$

De acordo com o valor de “ c ”, sete níveis de desempenho são possíveis, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Critérios com base no índice “ c ” para interpretação do desempenho de métodos de estimativa da ETo.

Valor de “ c ”	Desempenho
$> 0,85$	Ótimo
$0,76$ a $0,85$	Muito Bom
$0,66$ a $0,75$	Bom
$0,61$ a $0,65$	Mediano
$0,51$ a $0,60$	Sofrível
$0,41$ a $0,50$	Mau
$< 0,41$	Péssimo

Resultados e Discussão

Os valores médios observados da temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento (a $2,0$ m de altura) e o total de chuva, durante os quatro períodos de coletas de dados, podem ser observados na Tabela 3. Por meio desta pode-se perceber que em todos os períodos a velocidade média do vento foi superior a $2,0 \text{ m.s}^{-1}$, conforme recomendação de Viana (2001) para utilização do método da razão de Bowen.

A correlação entre os valores diários da ETo estimados pelo método FAO-56 Penman-Monteith (EToPM) e pelo método da razão de Bowen (EToRB) para o primeiro período de coleta de dados estão apresentados na Tabela 4 e na Figura 2. Pode-se observar que o valor do coeficiente de correlação foi de $0,71$, implicando em uma boa correlação entre os valores estimados. O valor do coeficiente de Wilmott foi de $0,74$, mostrando uma boa precisão entre as estimativas. Por conseguinte, o índice “ c ” apresentou um valor de $0,52$, considerado de desempenho sofrível.

Tabela 3 - Período de coleta de dados, valores médios da temperatura do ar, da umidade relativa do ar e da velocidade do vento e total de chuva.

Período de utilização	Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do vento (m.s^{-1})	Chuva (mm)
de 23/11 a 06/12 de 2001	27,84	69,10	2,30	8,0
de 09 a 22/12 de 2001	27,85	70,36	2,37	21,0
de 17 a 30/01 de 2002	27,47	71,08	2,21	15,3
de 06 a 19/02 de 2002	27,33	71,42	2,17	13,3

Tabela 4 - Período de utilização, coeficiente de correlação, índice de Wilmott e índice “c”.

Período de utilização	Temperatura do ar (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Chuva (mm)
de 23/11 a 06/12 de 2001	27,84	69,10	2,30	8,0
de 09 a 22/12 de 2001	27,85	70,36	2,37	21,0
de 17 a 30/01 de 2002	27,47	71,08	2,21	15,3
de 06 a 19/02 de 2002	27,33	71,42	2,17	13,3

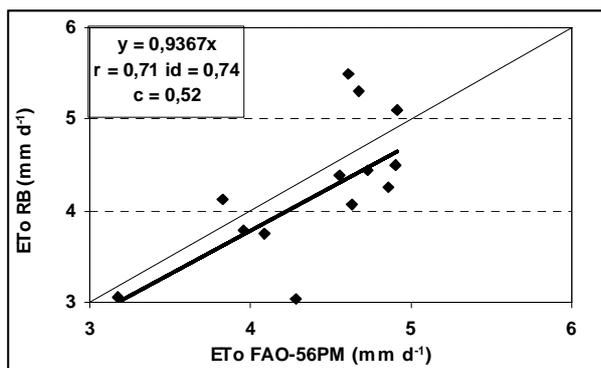


Figura 2 – Correlação entre a ETo estimada pela equação FAO-56 Penman-Monteith e pelo método da razão de Bowen, no primeiro período de coleta de dados.

O desempenho sofrível das estimativas pela metodologia da razão de Bowen neste período pode estar relacionado ao fato de os braços terem sido colocados muito próximos da superfície da grama. Ressalta-se, que posições próximas à grama, sob capacidade de campo, devem facilitar a ocorrência de gradientes do vapor d’água, entretanto, em baixas alturas há, provavelmente, a ocorrência de menores velocidades do vento. Como comentado por Perez et al. (1999), sob baixos gradientes de vapor d’água, originários de baixa velocidade do vento ou de déficit hídrico no solo, a razão de Bowen tende a valores elevados (o valor do denominador é muito baixo) inviabilizando a metodologia.

O desempenho sofrível mostrado pela metodologia de razão de Bowen nesse período de coleta de dados se opôs aos observados por Mastrorilli et al. (1989); Steduto e Hsiao (1998), que posicionaram os sensores a 0,25 e 1,25 m acima da superfície. Entretanto, foi semelhante ao encontrado por Viana (2001), sob mesma posição dos sensores, em ambiente protegido, onde segundo o autor baixos valores das velocidades do vento tornaram o valor da razão de Bowen muito elevado inviabilizando a metodologia.

Na Figura 3 tem-se o resultado da correlação entre os valores diários da EToPM e EToRB para o segundo período de medições. Nesse período, os dois braços do SRB estavam posicionados nas alturas 0,25 e 1,25 m, acima do solo.

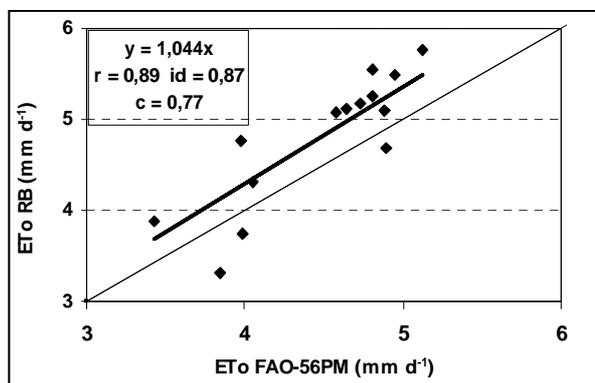


Figura 3 – Correlação entre a ETo estimada pela equação FAO-56 Penman-Monteith e pelo método da razão de Bowen, no segundo período de coleta de dados.

O valor do coeficiente de correlação para este período foi de 0,89, mostrando uma ótima correlação. O valor do coeficiente de Wilmott foi de 0,87, implicando em uma ótima precisão. O valor do índice “c” foi de 0,77, conseqüentemente também mostrando um desempenho muito bom do método da razão de Bowen neste período. Nota-se, que com o aumento da distância entre os braços, do primeiro para o segundo período de coleta de dados, houve alterações significativas no valor do índice “c”.

O desempenho da metodologia neste período foi muito diferente, o que pode indicar ser vantajosa a posição dos braços nas alturas 0,25 e 1,25 m, em comparação as distâncias 0,25 e 1,0 m. Azevedo (1998) e Silva (2000) relataram ter encontrado bom desempenho do método utilizando um SRB confeccionado pela Campbell Scientific, em Piracicaba. Ambos os autores posicionaram os braços do SRB nas alturas de 0,25 e 1,25 m.

No terceiro período de coleta de dados os dois braços do SRB foram posicionados nas alturas 0,50 e 1,25 m, acima do solo. Na Figura 4 encontra-se o resultado da correlação entre EToPM e EToRB. Observa-se que o índice “c” apresentou um valor de 0,88, considerado ótimo conforme a metodologia proposta por Camargo & Sentelhas (1997).

Nesse período de coleta de dados os dois braços estavam distanciados de 0,75 m, a mesma distância do primeiro período de coleta de dados, apesar dos desempenhos das estimativas terem sido muito diferentes. Provavelmente, a maior elevação dos braços inferior e superior facilitou a ocorrência de gradientes de vapor d’água pela maior ação dos ventos.

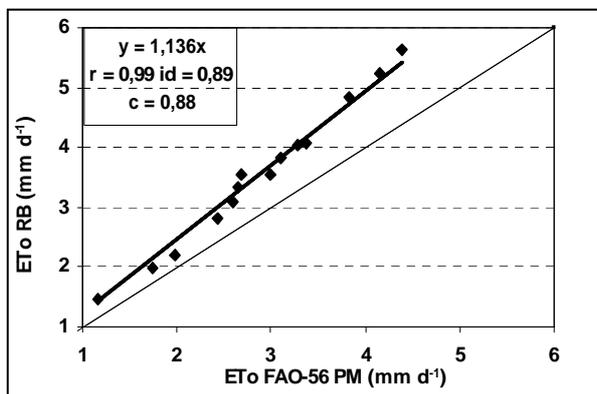


Figura 4 – Correlação entre a ETo estimada pela equação FAO-56 Penman-Monteith e pelo método da razão de Bowen, no terceiro período de coleta de dados.

No quarto período de coleta de dados foram obtidos os seguintes valores para os coeficientes de correlação e de Wilmott: 0,91 e 0,88, respectivamente (Figura 5). Nesse período, elevou-se o braço superior do SRB para a altura de 1,50 m acima do solo, deixando-se o braço inferior a 0,50 m acima do solo. O valor do índice “c” foi de 0,80, mostrando um desempenho muito bom da metodologia da razão de Bowen neste período. Nota-se, em oposição ao registrado no primeiro para o segundo período de coleta de dados, que apesar do aumento da distância entre os braços do terceiro para o quarto período de coleta de dados, ocorreu redução no valor do índice “c”. Como a quantidade de vapor d’água próxima à superfície diminuiu com a altitude, a elevação de ambos os braços, provavelmente, contribuiu para diminuir o gradiente de vapor d’água e a eficiência do método.

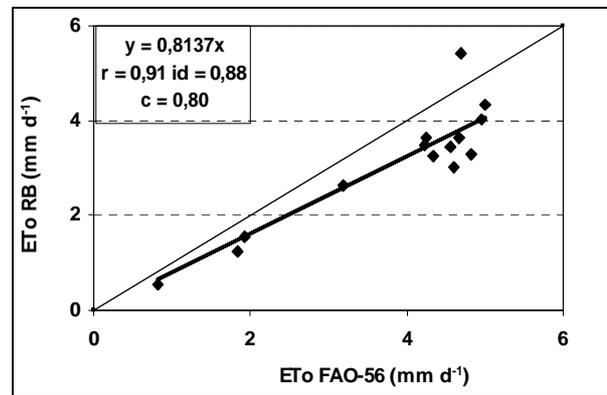


Figura 5 – Correlação entre a ETo estimada pela equação FAO-56 Penman-Monteith e pelo método da razão de Bowen, no quarto período de coleta de dados.

Trabalhos anteriores têm mostrado um bom desempenho da metodologia da razão de Bowen (Kroon, 1989; Fontana et al., 1991; Steduto e Hsiao, 1998; Alves e Pereira, 2000). Entretanto, os resultados aqui obtidos mostraram que parece haver uma dependência da metodologia com relação à altura dos sensores.

A grosso modo, pode-se afirmar que não ocorreram diferenças consideráveis nos valores das variáveis meteorológicas durante os quatro períodos de coleta de dados. Entretanto, recomendam-se trabalhos futuros com múltiplos braços psicrométricos instalados ao mesmo tempo para que se possa evitar possíveis erros devido a condições ambientais distintas.

Conclusões

As posições dos braços do sistema razão de Bowen influenciam o desempenho da metodologia nas estimativas da evapotranspiração de referência.

O melhor desempenho da metodologia da razão de Bowen foi obtido quando os psicrometros foram posicionados nas alturas 0,50 e 1,25 m, acima do solo.

Referências Bibliográficas

ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Modelling surface resistance from climatic variables?. **Agricultural Water Management**, v.42, n.1., p.371-385, 2000.

- AZEVEDO, B. M. **Evapotranspiração de referência obtida com a razão de Bowen, lisímetro de pesagem e equação de Penman-Monteith utilizando sistemas automáticos.** 1999. 81 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- 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, n.1, p.89-97, 1997.
- CUNHA, R.C.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R. Balanço de energia em cultura de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4, n.1, p.1-14, 1996.
- FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, n.26, p.403-410, 1991.
- MOURA, A. L.; MARTINS, D. Comparação da estimativa horária da evapotranspiração através de diferentes métodos. **Energia na Agricultura**, v.7, n.3, p.4-11, 1992.
- KROON, L. J. M. Profile derived estimation of evaporation after a change in vegetative cover: a numerical approach. **IAHS-Publication**, v.177, p.175-183, 1989.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PEREZ, P. J.; CASTELVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.97, p.141-150, 1999.
- SILVA, F. C. **Determinação da evapotranspiração utilizando o método do balanço de energia e lisímetro de pesagem.** 2000. 72 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes. IV. Validity of Bowen ratio-energy balance technique for measuring water vapor and carbon dioxide fluxes at 5-min intervals. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.89, p.215-228, 1998.
- VIANA, T. V. A. **Evapotranspiração obtida com o sistema razão de Bowen e um lisímetro de pesagem em ambiente protegido.** 2001. 138 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

