

DESEMPENHO DO MÉTODO DO BALANÇO DE ENERGIA - RAZÃO DE BOWEN NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

LEONARDO DUARTE BATISTA DA SILVA¹; GUSTAVO BASTOS LYRA²;
JONATHAS BATISTA GONÇALVES SILVA³; CAMILA FERREIRA DE PINHO¹;
ALEXANDRE LIOI NASCENTES¹; GILDA VIEIRA DE ALMEIDA¹ E MARCOS
VINICIUS FOLEGATTI⁴

¹ Departamento de Engenharia, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Campus UFRRJ, 23897-000, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: monitoreambiental@gmail.com; camilafepi@hotmail.com; alexandrelioi@gmail.com; gilda-almeida1@hotmail.com

² Departamento de Ciências Ambientais, Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Campus UFRRJ, 23897-000, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: gblyra@ufrj.br

³ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Campus UFJR, 36036-330, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, e-mail: jonathasbsilva@gmail.com

⁴ Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo – USP, Av. Pádua Dias 11, 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil, e-mail: mvfolega@usp.br

1 RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do método do balanço de energia - razão de Bowen (BERB) e Penman-Monteith (PM) na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) diária em relação as medidas de um lisímetro de pesagem. O experimento foi conduzido em Piracicaba, SP, numa área cultivada com grama batatais (*Paspalum notatum* Flügge) no período de 11 a 25/06/2000. Avaliou-se a exatidão das estimativas de ET_o com base no índice de concordância de Willmott (1981) (d) e no erro padrão de estimativa (EPE) e sua precisão pelo coeficiente de determinação (r^2) da regressão linear entre ET_o estimada e medida. O desempenho foi avaliado por meio do índice de confiança ($c = d \times r$) de Camargo e Sentelhas (1997). As médias das estimativas de ET_o pelo BERB e por PM não apresentaram diferenças estatísticas significativas (ANOVA, $p < 0,05$) em relação as médias de ET_o medida no lisímetro. O método de PM mostrou exatidão ($d = 0,99$ e $EPE = 0,09 \text{ mm d}^{-1}$) e precisão ($r^2 = 0,95$) superior ao BERB ($d = 0,92$, $EPE = 0,15 \text{ mm d}^{-1}$ e $r^2 = 0,86$). Contudo, o desempenho para os dois métodos BERB ($c = 0,85$) e PM ($c = 0,97$) foi superior a 0,85, ou seja, classificado como ótimo pelo índice c .

Palavras-chave: balanço de energia, consumo hídrico, modelo de Penman-Monteith, lisímetro de pesagem

BATISTA DA SILVA, L. D.; LYRA, G. B.; SILVA, J. B. G.; PINHO, C. F.;
NASCENTES, A. L.; ALMEIDA, G. V.; FOLEGATTI, M.V.
PERFORMANCE OF THE BOWEN RATIO-ENERGY BALANCE METHOD
FOR THE ESTIMATION OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION

2 ABSTRACT

This study aimed to evaluate the performance of Bowen ratio-Energy balance (BREB) and Penman-Monteith (PM) methods for the estimation of daily reference evapotranspiration (ET_o) in relation to measurements of a weighing lysimeter. The experiment was carried out in Piracicaba-SP, in an area cultivated with Bahia grass (*Paspalum notatum* Flüggé) from June 11th to 25th, 2000. ET_o estimation accuracy was evaluated based on the Willmott agreement index (d) and on the standard error estimation (SEE), and its precision through the determination coefficient (r²) of the linear regression between estimated and measured ET_o. The performance was evaluated using the confidence index (c = d x r) of Camargo and Sentelhas. The means of ET_o estimates through BREB and PM did not show significant statistical differences (ANOVA p < 0.05) compared with the means of ET_o measured in the lysimeter. The PM method showed higher agreement (d = 0.99 and SEE = 0.09 mm d⁻¹) and precision (r² = 0.95) compared with BREB (d = 0.92, SEE = 0.15 mm d⁻¹ and r² = 0.86). However, the performances of both BREB (c = 0.85) and PM (c = 0.97) methods were above 0.85, which is considered optimal according to the index c.

Keywords: energy balance; water consumption; Penman-Monteith model; weighing lysimeter

3 INTRODUÇÃO

Métodos micrometeorológicos de determinação da evapotranspiração (ET) de superfícies vegetadas apresentam vantagens em relação a métodos de medida direta, como lisímetros e métodos baseados na umidade do solo. Entre as vantagens, destaca-se que não requerem alterações da superfície, podem ser empregados com grande grau de mobilidade, podem ser usados para pequenos intervalos de tempo, e, associado à determinação de ET, podem prover informações dos fluxos de calor sensível e fluxo de dióxido de carbono ou outros gases. Contudo, métodos micrometeorológicos também apresentam desvantagens, como por exemplo, requerem medidas contínuas dos elementos meteorológicos necessários à determinação de ET, alguns de difícil determinação e obtidos em alta frequência. Apesar disso, os instrumentos atualmente existentes são capazes de suplantar a necessidade de aquisição de dados de maneira eficaz e com viabilidade econômica.

Dentre os métodos micrometeorológicos, o balanço de energia – razão de Bowen (BERB) tem sido utilizado como padrão na determinação experimental do fluxo de calor latente (ET) e do fluxo de calor sensível de diversos cultivos (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2012). A adoção do BERB como padrão é devido, principalmente, a sua simplicidade e praticidade em relação a outros métodos micrometeorológicos, como a correlação de vórtices turbulentos e método aerodinâmico.

Bowen (1926) introduziu o conceito de razão de Bowen como sendo a relação entre o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (LE). Esta relação pode ser expressa, de forma simplificada, como o produto do coeficiente psicrométrico pela razão entre o gradiente de temperatura do ar e o gradiente de pressão de vapor de água no ar, em pelo menos dois níveis acima da superfície.

A validade do método BERB foi verificada em diversos estudos (CARDOSO et al., 2005; SOUZA et al., 2008; ARRUDA; VALENTINI; SANCHES, 2011; GOMIDE; KOBAYASHI; BORATTO, 2012). Contudo, existem limitações à aplicação do BERB próximo do nascer e pôr do sol, devido aos pequenos gradientes de temperatura (T) e pressão de vapor

d'água (e) do ar, que resultam em valores para a razão de Bowen (β) de aproximadamente -1 ou ∞ . Também podem ocorrer restrições à aplicação do método em culturas de coberturas não uniforme e outras condições adversas (advecção).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de sistemas automáticos de razão de Bowen na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) e comparar as estimativas com os valores estimados pelo modelo de Penman-Monteith e com os medidos em lisímetro de pesagem.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na área experimental de irrigação ($22^{\circ}42'30''$ S; $47^{\circ}30'00''$ W; 576 m de altitude) do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo - ESALQ/USP, situada na fazenda Areão, no município de Piracicaba, SP, no período de 11 a 25/06/2000. O solo local apresentava declividade aproximada de 2 %, sendo classificado como Nitossolo (EMBRAPA, 2006), com horizonte A de textura argilosa (média de 45 % de argila) e profundidade média de 0,30 m. Conforme a classificação de Köppen, o clima de Piracicaba é Cwa - subtropical úmido, com verão chuvoso e inverno seco - com precipitação média anual de 1.250 mm. As temperaturas do ar médias mensais variam de $24,8^{\circ}\text{C}$ no verão a $17,1^{\circ}\text{C}$ no inverno, com média anual de $21,4^{\circ}\text{C}$ (SILVA; FOLEGATTI; VILLA NOVA, 2005).

A evapotranspiração de referência (ET_0) foi estimada pelos métodos do balanço de energia – Razão de Bowen (BERB) e de Penman-Monteith (PM) e comparadas com ET_0 obtida por um lisímetro de pesagem. As medidas necessárias a determinação ET_0 foram realizadas em uma área de 10.000 m² cultivado com grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé), na área experimental. Efetuaram-se irrigações frequentes, com um sistema de aspersão convencional, a fim de se manter a umidade do solo próxima da capacidade de campo, ou seja, ideais à evapotranspiração de referência. O monitoramento da tensão da água no solo foi realizado por meio de tensiômetros. A altura da grama foi mantida por cortes, sempre que necessário em, aproximadamente, 0,12 - 0,15 m.

Na estimativa de ET_0 pelo BERB utilizaram-se dois sistemas automáticos de razão de Bowen (*Bowen ratio system*, Campbell Scientific Inc., Utah, USA), ambos instalados no centro da área experimental. Cada sistema de razão de Bowen foi conectado a um sistema automático de aquisição de dados (*datalogger*) independente. Um sistema automático de razão de Bowen (SARB 1) foi conectado a um *datalogger* modelo 21X (Campbell Scientific Inc., Utah, USA) e o outro sistema automático de razão de Bowen (SARB 2) conectado a um *datalogger* modelo 23X (Campbell Scientific Inc., Utah, USA). Os SARBs realizavam medidas dos seguintes elementos micrometeorológicos: saldo de radiação à superfície (R_n); fluxo de calor no solo, realizado em dois pontos (G_1 e G_2), ambos a 0,08 m de profundidade; gradientes verticais de temperatura (ΔT) e umidade do ar acima da superfície. A temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e a umidade absoluta (k gm^{-3}) foram medidas nos níveis 0,10 e 1,50 m acima da superfície vegetada. As medidas de umidade absoluta foram transformadas em pressão parcial do vapor d'água do ar (e , kPa) para serem usadas na determinação da razão de Bowen. O saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) foi obtido a 1,00 m acima da superfície vegetada e os fluxos de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) foram mensurados a 0,08 m abaixo de superfície do solo. As medidas desses elementos foram realizadas a cada dez segundos, sendo suas médias armazenadas a cada vinte minutos.

Na estimativa dos fluxos de calor sobre uma superfície, o balanço de energia pode ser representado de forma simplificada como segue na Equação 1:

$$R_n - G = H + LE \quad (1)$$

em que: H é o fluxo de calor sensível; LE é o fluxo de calor latente.

Bowen (1926) relacionou os fluxos de calor sensível e latente, conforme equação abaixo, que define a razão de Bowen (β).

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

Substituindo-se a eq. 2 na eq. 1, obtém-se a relação para determinação de LE pelo método do Balanço de energia – Razão de Bowen:

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

Considerou-se positivo o fluxo na direção da atmosfera ou subsolo para a superfície, e negativo quando a direção do fluxo foi da superfície para a atmosfera ou subsolo. Matematicamente, para que tais considerações fossem aplicadas no cálculo do fluxo de calor latente, fez-se necessário adicionar o sinal negativo junto ao termo de energia disponível, ou seja $-(R_n - G)$. O fluxo de calor no solo G foi obtido como a média aritmética das medidas obtidas nos dois pontos [$G = (G_1 + G_2)/2$]. Após a determinação de LE, o H foi estimado pela eq. 2.

Na estimativa de LE pela eq. 3, para cada intervalo de tempo correspondente a 20 minutos, a razão de Bowen (β) foi estimada em função dos gradientes de temperatura do ar e pressão atual de vapor d'água do ar (Δe) obtidos com os SARB, conforme a equação abaixo:

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

em que: γ é o coeficiente psicrométrico ($0,0626 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$). O valor do coeficiente psicrométrico foi obtido pela seguinte equação: $\gamma = (P_{atm} c_p) / (\lambda \varepsilon)$. Devido à baixa amplitude anual da pressão atmosférica (P_{atm} , kPa) ao longo do ano em Piracicaba (LYRA et al., 2004), considerou-se no cálculo de γ a P_{atm} média de 94,93 kPa; c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($1,005 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); λ é o calor latente de evaporação ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$) à temperatura do ar de $20 \text{ } ^\circ\text{C}$; e ε é a razão entre a massa molecular do vapor d'água e a massa molecular do ar (0,622).

Após a determinação do LE pelo método da BERB foi possível calcular evapotranspiração de referência (ET_o), em intervalos de 20 min em todo o período estudado, pela relação a seguir:

$$ET_o = \frac{LE}{\lambda \cdot 72 \cdot t} \quad (5)$$

em que: t é intervalo de tempo considerado na determinação de LE, ou seja, 20 minutos; 72 é a constante utilizada para ajustar a escala de tempo; e λ é o calor latente de evaporação, necessário para converter o fluxo de calor latente em lâmina de água evapotranspirada. Os valores de ET_o de 20 min foram então integrados diariamente para determinação da $ET_{o,\beta}$ diária (mm d^{-1}). Na estimativa de ET_o consideram-se valores diários conforme recomendação de Bezerra, Silva e

Ferreira (2008) e Sousa et al. (2010). Foram também descartadas as estimativas de ET_o originários de valores $-0,7 < \beta < -1,3$, conforme Perez et al. (1999).

A estimativa da evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith ($ET_{o,PM}$) (eq. 6) foi obtida em função dos elementos meteorológicos medidos por uma estação meteorológica automática. A estação meteorológica forneceu os seguintes elementos meteorológicos: velocidade do vento (O14A, MetOne Instruments, GrantsPass, OR), temperatura e umidade relativa do ar (HMP35C, Vaisala, Woburn, MA) coletados a 2 m de altura. Foram armazenados valores médios de 30 min, a partir de medidas obtidas com frequência de 1 Hz, e também os valores extremos de temperatura e umidade relativa do ar, por um *datalogger* (CR10X, Campbell Scientific Inc., Utah, USA).

O modelo de Penman-Monteith original foi apresentado por Monteith (1965):

$$LE = \frac{s(Rn - G) + \rho c_p \frac{D_{ar}}{r_a}}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (6)$$

em que: LE é calor latente de evapotranspiração ($MJ m^{-2} d^{-1}$); Rn é saldo de radiação a superfície ($MJ m^{-2} d^{-1}$); G é o fluxo de calor sensível no solo ($MJ m^{-2} d^{-1}$); ρ é a massa específica do ar atmosférico ($1,26 kg m^{-3}$); D_{ar} é o déficit de pressão do vapor d'água a temperatura do ar ($= e_s - e_a$, kPa); e_s e e_a são, respectivamente, a pressão de saturação e parcial do vapor d'água do ar (kPa); r_c é a resistência da cobertura vegetal ($s m^{-1}$); r_a é a resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível e calor latente de evaporação ($s m^{-1}$); γ é o coeficiente psicrométrico ($0,0626 kPa ^\circ C^{-1}$); s é a tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água, no ponto dado pela temperatura do ar ($kPa ^\circ C^{-1}$).

A tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água foi estimada pela relação (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997):

$$s = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (7)$$

em que, e_s é a pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa); T é a temperatura do ar média diária ($^\circ C$).

No cálculo da pressão de saturação do vapor d'água foi utilizado a equação de Tetens:

$$e_s = 0,6108 \times 10^{\frac{7,5T}{237,3+T}} \quad (8)$$

A pressão atual de vapor d'água foi calculada da seguinte forma:

$$e_a = \frac{e_s \cdot UR}{100} \quad (9)$$

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

Assumiu-se, em concordância com a parametrização proposta por Smith et al. (1991), a equação 10 para cálculo da resistência aerodinâmica (r_a , $s m^{-1}$):

$$r_a = \frac{208}{u_2} \quad (10)$$

em que, u_2 é a velocidade do vento (m s^{-1}) medida 2,0 m de altura.

A relação entre a resistência da cobertura vegetal e a resistência aerodinâmica; foi quantificada por meio da equação (11).

$$\frac{rc}{ra} \cong 0,33 \cdot u_2 \quad (11)$$

A medida direta da evapotranspiração de referência foi obtida por meio de um lisímetro de pesagem, composto por três células de carga com capacidade de 1000 kg cada. A ET_o foi determinada pela variação da massa do lisímetro de pesagem gramado (*Paspalum notatum* Flügge). O lisímetro possuía as seguintes dimensões: 0,70 m de profundidade, 1,00 m de comprimento e 1,00 m de largura. Detalhes do lisímetro e do seu manejo foram descritos em Silva et al. (1999) e Silva, Folegatti e Maggiotto (1999).

Para avaliação de ET_o diária estimada pelo BERB ($ET_{o,\beta}$) e pelo método PM ($ET_{o,PM}$), considerou-se como padrão ET_o medida no lisímetro ($ET_{o,lis}$). Avaliou-se a normalidade de $ET_{o,\beta}$, $ET_{o,PM}$ e $ET_{o,lis}$ pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($p < 0,05$). No caso de distribuição normal dos dados, aplicou-se a análise de variância para medidas repetidas (RM-ANOVA) a $p < 0,05$.

A aproximação entre os valores de ET_o estimada e medida foi avaliada com base no índice de concordância (d) proposto por Willmott (1981). Este índice varia de 0 a 1, quanto mais próximo de 1 maior a aproximação entre os dados observados e estimados.

O desempenho das estimativas foi avaliado através do índice de confiança (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997) e determinado pelo produto entre o coeficiente de correlação de Pearson e o índice de concordância d , ou seja, $c = r d$. A interpretação do índice é baseada nas classes propostas por Camargo e Sentelhas (1997), que consideram índice $c > 0,85$ como desempenho ótimo, entre 0,76 e 0,85, muito bom, entre 0,66 e 0,75, bom, entre 0,61 e 0,65, mediano, entre 0,51 e 0,60, sofrível, entre 0,41 e 0,50, mau e menor que 0,40 desempenho péssimo.

Utilizou-se também nas análises das estimativas de ET_o o Erro Padrão de Estimativa (EPE), que quantifica o desvio médio entre os dados observados e estimados. No caso de normalidade das estimativas e medidas de ET_o , aplicou-se a análise de regressão linear simples ($Y = \beta_1 X$) entre os valores observados (X , $ET_{o,lis}$) e estimados (Y , $ET_{o,\beta}$ ou $ET_{o,PM}$) e por meio do teste de Student (t) verificaram-se as hipóteses testadas na análise de regressão: $H_0: X = Y$ e $H_1: X \neq Y$ para $p < 0,05$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($p < 0,05$), a distribuição de frequência das estimativas de ET_o diária pelos métodos do balanço de energia-razão de Bowen, pelos dois SARBs ou pelo método de Penman-Monteith, assim como as medidas obtidas com o lisímetro de pesagem, não apresentaram diferenças estatísticas significativas de uma distribuição normal teórica. Assim, aplicou-se a análise de variância para medidas repetidas (RM-ANOVA) para a ET_o diária obtida pelos diversos métodos e pelo lisímetro. Pela RM-ANOVA, as médias de ET_o

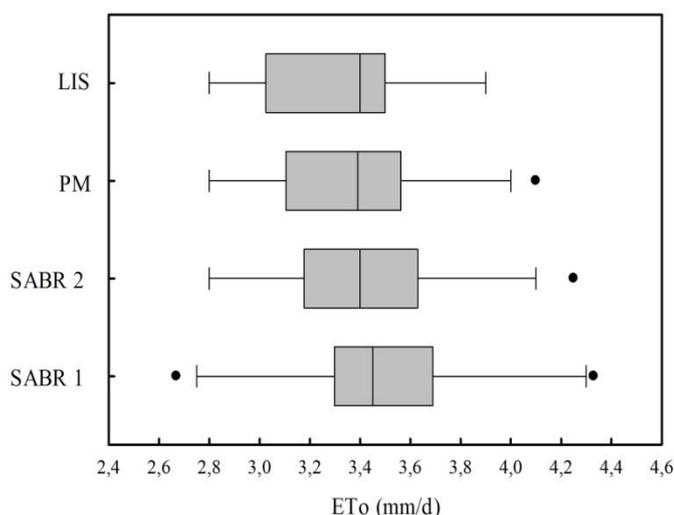
durante o período experimental não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre si ($p < 0,05$).

Na média, ET_o obtida pelos SARB 1 ($3,5 \pm 0,46 \text{ mm d}^{-1}$) e SARB 2 ($3,44 \pm 0,41 \text{ mm d}^{-1}$) superestimaram as medidas realizadas pelo lisímetro ($3,32 \pm 0,35 \text{ mm d}^{-1}$) em 5,62 e 3,69 %, respectivamente (Figura 1). O modelo de Penman-Monteith ($3,36 \pm 0,39 \text{ mm d}^{-1}$) superestimou as medidas do lisímetro em apenas 1,23 %. Os coeficientes de variação (CV) das estimativas não apresentaram diferenças consideráveis entre os métodos de determinação de ET_o e o lisímetro, e variaram entre 10,6 % (lisímetro) e 13,2 % (SARB 1). Assim, os valores de CV indicaram baixa dispersão dos dados. Segundo Mello (1998), esses resultados sugerem que o manejo do lisímetro foi adequado.

A amplitude de variação da ET_o medida pelo lisímetro ($1,1 \text{ mm d}^{-1}$) foi inferior as das estimativas dos dois SARB (SARB1 – $1,66 \text{ mm d}^{-1}$ e SARB2 – $1,45 \text{ mm d}^{-1}$) e do método de PM ($1,3 \text{ mm d}^{-1}$). Os extremos de $ET_{o,lis}$ foram 2,8 e $3,9 \text{ mm d}^{-1}$. ET_o mínima para o SARB2 e PM foram iguais a do lisímetro, sendo de $2,67 \text{ mm d}^{-1}$ a ET_o mínima para o SARB2, enquanto os máximos foram $4,25 \text{ mm d}^{-1}$ (SARB 1), $4,33 \text{ mm d}^{-1}$ (SARB 2) e $4,10 \text{ mm d}^{-1}$ (PM).

Para Piracicaba, SP, Lyra et al. (2004) avaliaram as estimativas de ET_o diária pelo método de Penman-Monteith parametrizado no boletim FAO-56 (PM-FAO56) (ALLEN et al., 1998) em função de diversos métodos de estimativa do déficit de pressão de saturação do vapor d'água do ar (D_{ar}) e compararam com medidas de ET_o obtidas por lisímetro de pesagem, cultivado com grama batatais (*Paspalum notatum* Flügge). Os autores observaram superestimativa da média de ET_o entre 1,43 e 17,67 %, dependendo do método de estimativa de D_{ar} . De modo similar ao observado no presente trabalho, as médias das estimativas pela maior parte dos métodos e das medidas do lisímetro obtidas por Lyra et al. (2004) não diferiram estatisticamente.

Figura 1. Evapotranspiração de referência diária (ET_o , mm d^{-1}) medida em lisímetro de pesagem (LIS) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (PM) e por dois Sistemas Automáticos de Razão de Bowen (SABR 1) e 2 (SABR 2) no período de 11 a 25 de junho de 2000, em Piracicaba, SP.



Medeiros (2002) avaliou as estimativas diárias de ET_o PM-FAO56 em relação as medidas de um lisímetro de pesagem cultivado com grama gengibre (*Paspalum maritimum* L.),

nas condições climáticas de Paraipaba, CE; e observaram superestimativa da média de ET_o de 4,34 %. Padrão similar foi observado por Mendonça et al. (2003) ao compararem as estimativas de ET_o diária pelo método de PM-FAO-56, em relação às medidas de um lisímetro de pesagem com grama batatais na região Norte Fluminense, com superestimativa da média de ET_o de 9,7 %.

Como não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre médias das estimativas de ET_o pelos dois SARBs, utilizou-se na análise de regressão entre ET_o determinada pelo método BERB e as medidas lisimétricas, a média de ET_o obtida nos dois SARBs para representar $ET_{o,\beta}$. Pela análise de regressão, as estimativas de $ET_{o,\beta}$ e de $ET_{o,PM}$ apresentaram coeficientes de determinação superiores a 0,8. O método de Penman-Monteith apresentou maior precisão das estimativas em relação as medidas do lisímetro. A relação entre $ET_{o,\beta}$ e $ET_{o,PM}$ apresentou r^2 de 0,83, sendo inferior às observadas entre os métodos e o lisímetro. Esses resultados podem ser confirmados pela proximidade das estimativas em torno da linha 1:1 nas Figuras 2 e 3. Os coeficientes de determinação foram próximos aos observados por Allen et al. (1989) (0,94) e Lyra et al. (2004) (entre 0,88 e 0,93) para as estimativas do método de Penman-Monteith em relação às medidas lisimétricas, contudo, superiores aos determinados por Medeiros (2002) (0,56), Mendonça et al. (2003) (0,58) e Barros et al. (2009) (0,61), que obtiveram menor precisão das estimativas de ET_o .

Figura 2. Análise de regressão entre os valores de ET_o : (A) médias das estimativas por dois Sistemas Automáticos de Razão de Bowen ($ET_{o,\beta}$); e (B) estimado por Penman-Monteith ($ET_{o,PM}$) em relação a medidas em lisímetro.

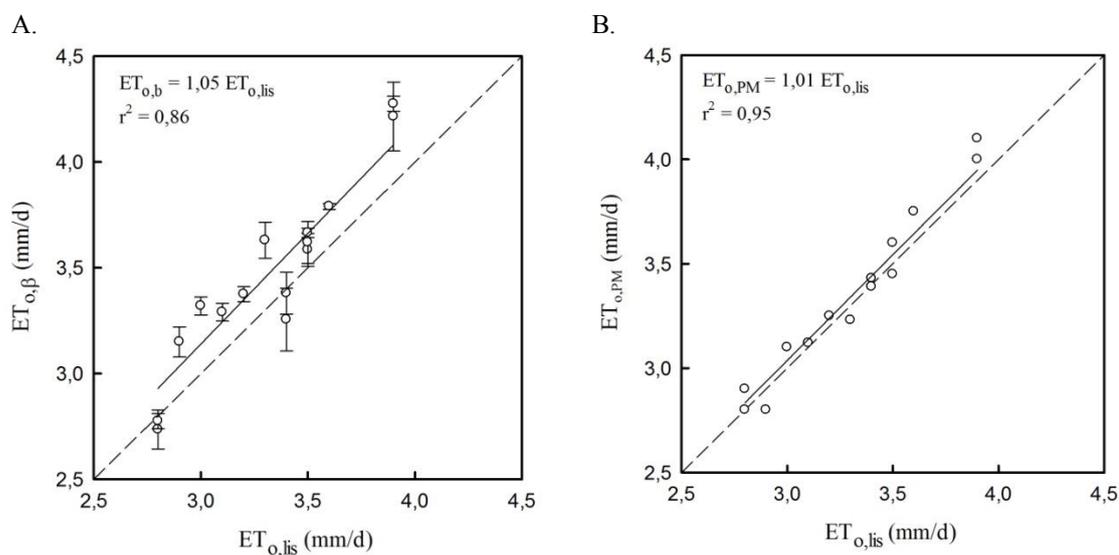
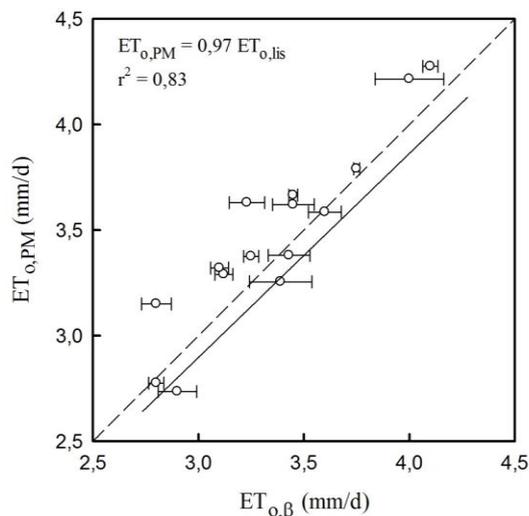


Figura 3. Análise de regressão entre os valores de ET_o estimado por dois Sistemas Automáticos de Razão de Bowen ($ET_{o,\beta}$) em relação às estimativas do modelo de Penman-Monteith ($ET_{o,PM}$) no período de 11 a 25 de junho de 2000, em Piracicaba, SP. As barras horizontais indicam o desvio-padrão das observações.



Em Fortaleza, CE, Cardoso et al. (2005) avaliaram o desempenho das estimativas de ET_o de um sistema de Razão de Bowen composto por pares de psicrômetros, que foram dispostos em alturas variadas (perfil 1 - 0,25 e 1 m, perfil 2 - 0,25 e 1,25 m, perfil 3 - 0,50 e 1 m e perfil 4 - 0,50 e 1,25 m) durante o período experimental, em relação à ET_o estimada por Penman-Monteith. O sistema estava instalado acima de uma superfície cultivada com grama americana (*Bouteloua americana* L. Scribin) em ótima condição hídrica. Os autores observaram dispersão das estimativas de ET_o por PM em relação ao BERB dependente das alturas e com r^2 entre 0,50 (perfil 1) e 0,98 (perfil 4).

Biudes et al. (2008) estimaram os fluxos de calor latente (ET) e sensível pelo método BERB em pastagem mista (Tanzânia – *Panicum maximum*, Carona – *Elyonurus muticus* e *Brachiaria humidicola*), em Santo Antônio do Leverger, MT. Os autores realizaram medidas de temperatura e umidade do ar em três alturas (0,55, 1,00 e 1,55 m) e determinaram a razão de Bowen para combinações duais dessas alturas (perfil 1 – 0,55 e 1,00 m; perfil 2 – 0,55 e 1,55 m e perfil 3 – 1,00 e 1,55 m). A evapotranspiração obtida pelo BERB foi comparada com estimativas pelo método de Penman-Monteith. A maior precisão das estimativas foi observada para o perfil 1 (0,81) e a menor (0,67) para o perfil 3.

Como, independente do método, o intercepto da regressão linear entre as estimativas e as medidas do lisímetro não foram significativas ($p < 0,05$), consideraram-se as retas das regressões forçadas a passar pela origem. Esse resultado indicou que nenhum dos dois métodos induziu a erro sistemático aditivo apreciável nas estimativas de ET_o (Willmott, 1981). De forma geral, a tendência dos métodos foi de superestimar as medidas de $ET_{o,lis}$, entre 1 e 5 % em relação a $ET_{o,PM}$ e $ET_{o,\beta}$. A proximidade dos valores da inclinação de 1, indicaram no presente caso, que os erros foram decorrente, principalmente, de erro sistemático proporcional (WILLMOTT, 1981). No caso de $ET_{o,PM}$ em relação a $ET_{o,\beta}$, o padrão foi contrário e de subestimativa de $ET_{o,PM}$ de aproximadamente 3,4 %.

Allen et al. (1989) observaram tendência de superestimativa da ET_o estimada pelo método de Penman-Monteith em torno de 2 %. Resultado similar foi reportado por Medeiros (2002), que apesar da elevada dispersão das estimativas de ET_o pelo método de Penman-

Monteith, obtiveram superestimativa de apenas 4,5 %. Barros et al. (2009) observaram subestimativa de 5,0 % entre ET_o diária estimada por PM-FAO56 e as medidas de um lisímetro cultivado com grama batatais, em Seropédica, RJ.

Cardoso et al. (2005) observaram tendência tanto de superestimativa (6,3 – 18,6 %), como subestimativa (0,4 – 13,6 %) de $ET_{o,PM}$ em relação as estimativas do BERB, e dependente das alturas dos psicrômetros. Biudes et al. (2008) observaram coeficiente angular de 0,76 e intercepto de 0,39 da regressão entre ET_o estimada por PM-FAO56 e pelo método da BERB.

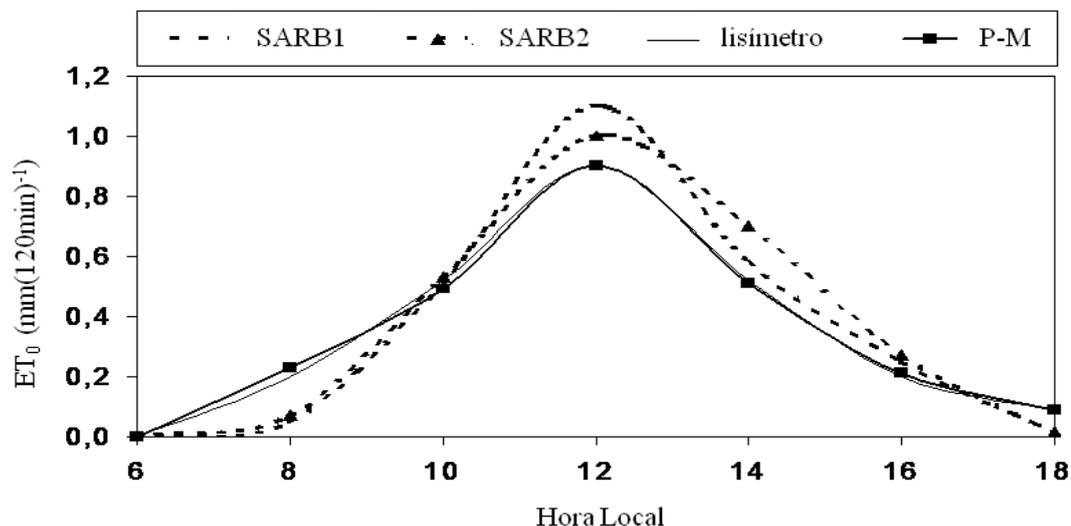
O erro padrão de estimativa para $ET_{o,\beta}$ foi de 0,15 mm d⁻¹, enquanto para $ET_{o,PM}$ o EPE foi de 0,09 mm d⁻¹, esses valores representaram menos de 5 % da média de ET_o medida no lisímetro. Entre $ET_{o,\beta}$ e $ET_{o,PM}$ o EPE foi de 0,16 mm d⁻¹. Esses valores de EPE foram inferiores aos obtidos pelas estimativas de ET_o pelo método de Penman-Monteith por Allen et al. (1989) (0,31 mm d⁻¹), Lyra et al. (2004) (entre 0,40 e 0,80 mm d⁻¹), Mendonça et al. (2003) (1,0 mm d⁻¹) e Barros et al. (2009) (0,62 mm d⁻¹). Medeiros (2002) observaram o erro médio absoluto de 0,48 mm d⁻¹.

Baseado no coeficiente de concordância d de Willmott, as estimativas de $ET_{o,PM}$ (0,99) mostraram concordância superior à observada para $ET_{o,\beta}$ (0,92) em relação as medidas de $ET_{o,lis}$, enquanto entre $ET_{o,\beta}$ e $ET_{o,PM}$ d foi de 0,94. Em termos de desempenho, os métodos foram classificados como de ótimo desempenho ($c > 0,85$) pelo índice c proposto por Camargo e Sentelhas (1997). Cardoso et al. (2005) obtiveram desempenho das estimativas de $ET_{o,PM}$ em relação a ET_o determinada por BERB entre sofrível e ótimo (perfil 1 - $0,51 < c < 0,60$ - perfil 4) e acurácia, baseada no coeficiente d de Willmott, entre 0,74 (perfil 1) e 0,89 (perfil 4). Resultado similar foi apresentado por Biudes et al. (2008), com desempenho de bom (perfil 3) a ótimo (perfil 1 e 2) e concordância $d > 0,89$ (perfil 3). Barros et al. (2009) observaram concordância das estimativas $d > 0,86$, contudo, o desempenho do modelo de PM foi apenas mediano pelo índice c .

A variação horária da ET_o foi similar em todos os dias analisados, assim, selecionou-se o dia 17/06 para ilustrar os padrões de variação diurna de ET_o . A variação da evapotranspiração de referência durante o período diurno do dia 17/06, estimada pelos dois sistemas automáticos de razão de Bowen (SARB 1 e SARB 2), pelo modelo de Penman-Monteith e medido pelo lisímetro de pesagem, para uma integração de 120 minutos, é apresentada na Figura 4. A variação diurna foi similar nos dois sistemas de razão de Bowen, que apresentaram valor máximo próximo às 12 h, porém o início da mensuração pelo modelo de Penman-Monteith e pelo lisímetro foi às 6 h, enquanto que o início da estimativa pelos sistemas automáticos de razão de Bowen foi às 8 h. Este fato foi observado em todos os dias do período de coleta de dados e pode ser explicado pelo pequeno gradiente de temperatura do ar e de pressão de vapor nos horários antes das 8 h entre as alturas consideradas.

De qualquer forma, as estimativas dos dois SARB entre o período das 08-10 h e de 17-18 h mostraram tendência de subestimativa das medidas do lisímetro, enquanto das 10-17 h observou-se superestimativa. Nos horários próximos ao nascer do sol e ao ocaso, ocorre inversão dos fluxos de calor e com isso pequenos gradientes de temperatura e umidade do ar, o que resulta em valores da razão de Bowen elevados e assim baixos valores de fluxo de calor latente.

Figura 4. Variação da evapotranspiração de referência, em mm (120 min)⁻¹, estimada por dois sistemas automáticos de razão de Bowen (SARB1 e SARB2), pelo modelo de Penman-Monteith (P-M) e medidos por um lisímetro de pesagem, para o dia 17/06/2000, em Piracicaba, SP



Ressalta-se, que durante todo o período experimental ocorreu apenas um evento de precipitação, e de apenas 1,5 mm no dia 21/06. Com isso, o efeito da precipitação sobre o funcionamento dos sistemas automático de razão de Bowen não pode ser avaliado neste trabalho.

6 CONCLUSÕES

As estimativas da evapotranspiração obtidas pelos sistemas automáticos de razão de Bowen e pelo método de Penman-Monteith apresentam desempenho satisfatório nas estimativas da evapotranspiração de referência diária.

O método da razão de Bowen – Balanço de energia subestima a evapotranspiração de referência nos horários próximos ao nascer do sol e ocaso, devido aos pequenos gradientes de temperatura e umidade do ar. Nos demais horários, o método superestima a evapotranspiração.

7 AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro e auxílio com bolsa.

8 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, Madison, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989.

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ARRUDA, J. C.; VALENTINI, C. M. A.; SANCHES, L. Balanço de energia em uma pastagem de braquiária em Mato Grosso. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 13, p. 168-177, nov. 2011.
- BARROS, V. R.; SOUZA, A. P.; FONSECA, D. C.; SILVA, L. B. D. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.
- BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM- landsat5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.
- BIUDES, M. S.; VALENTINI, C. M. A.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; NOGUEIRA, J. S. Estimativa da evapotranspiração numa pastagem mista, em condições de cerrado, pelos métodos de razão de Bowen e Penman-Monteith. **Ciência e Natura**, Santa Maria, RS, v. 30, n. 1, p. 71-86, 2008.
- BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review Serial 2**, New York, v. 27, p. 779-787, 1926.
- 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**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARDOSO, G. B.; VIANA T. V. A.; AZEVEDO, B. M.; SOUSA, V. F.; SOUZA, F. Determinação da ET de referência pela razão de Bowen com psicrômetros instalados a diferentes alturas. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 36, n. 1, p. 16-23, 2005.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.
- GOMIDE, R. L.; KOBAYASHI, M. K.; BORATTO, I. M. P. Monitoramento automático da necessidade hídrica das culturas do feijoeiro e milho por meio do balanço de energia/ razão de Bowen. **Irriga**, Botucatu, p. 453-466, 2012. Edição Especial.
- LYRA, G. B.; PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; SANTIAGO, A. V.; FOLEGATTI, M. V. Média diária do déficit de pressão de saturação do vapor d'água do ar e sua influência na evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith (FAO 56) em Piracicaba - SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 328-337, 2004.
- MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE.**

2002. 103 p. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MELLO, J. L. P. **Análise de sensibilidade dos componentes da equação de Penman-Monteith-FAO**. 1998. 78 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. In: SYMPOSIUM OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 19th., London, Swansea, 1964. **Anais...** Cambridge: Cambridge University Press, 1965. p. 205-234.

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

PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; VILLA-NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas: Fundação de Apoio à Pesquisa Agrícola, 2012. 342 p.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBANEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 97, n. 3, p. 141-150, 1999.

SILVA, F. C.; FOLEGATTI, M. V.; MAGGIOTTO, S. R. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 53-8, 1999.

SILVA, F. C.; FOLEGATTI, M. V.; PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A. Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 19-23, 1999.

SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração do capim tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 705-712, 2005.

SMITH, M.; ALLEN, R.; MONTEITH, J.; PERRIER, A.; PEREIRA, L.; SEGEREN, A. **Report of the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 54 p.

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

SOUZA, C. B.; SILVA, B. B.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P. R. Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 400-407, 2008.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Palm Beach, v. 2, n. 2, p. 184-94, 1981.