

SISTEMAS AUTOMÁTICOS NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

AZEVEDO, Benito Moreira de⁽¹⁾; FOLEGATTI, Marcos Vinícius⁽²⁾; ANGELOCCI, Luiz Roberto⁽²⁾; MOREIRA, Fátima Lorena Magalhães⁽³⁾; VIANA, Thales Vinícius de Araújo⁽¹⁾

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com os objetivos de estimar a evapotranspiração de referência (ET_o), a razão de Bowen (β), em superfície vegetada com grama (*Paspalum notatum flügge*), e comparar os resultados obtidos com os dados medidos com lisímetro de célula de carga e com a equação de Penman-Monteith. Os dados analisados neste trabalho foram os obtidos do dia 1º de novembro ao dia 10 de dezembro de 1996. Os resultados analisados na escala horária indicaram haver maior correlação entre a metodologia FAO/1991 e a estimativa realizada com o método da razão de Bowen. Obtendo-se r^2 médio de 0,96, para os dias 02, 05, 06, 08 e 09 de dezembro de 1996, quando as interferências pluviométricas foram reduzidas e o equipamento foi manuseado mais adequadamente. Os valores de i_d para esses dias apresentaram média de 0,98.

PALAVRAS-CHAVE: lisímetro, razão de Bowen, Penman-Monteith.

INTRODUÇÃO

A estimativa diária do consumo de água pelas culturas pode ser obtida baseando-se em mensurações relativamente simples e realizáveis em campo, e as estimativas meteorológicas do fluxo de água na atmosfera podem prover facilmente valores representativos da evapotranspiração. Com o recente desenvolvimento da tecnologia de sensores e sistemas de aquisição de dados, é possível estimar muito mais facilmente, de forma direta e em tempo real a evapotranspiração, e com um custo relativamente baixo.

Este trabalho tem como objetivos estimar a evapotranspiração de referência (ET_o), em superfície vegetada com grama (*Paspalum notatum flügge*), a razão de Bowen (β), o fluxo de calor latente na área gramada e comparar os resultados obtidos com os alcançados através de método lisimétrico e com o método combinado de Penman-Monteith, parametrizado pela Food and Agriculture Organization (FAO/1991).

⁽¹⁾ Prof. Adjunto na Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, e-mail: benito@ufc.br, fax: (085) 2531093.

⁽²⁾ Prof. Dr. Livre Docente ESALQ/USP, Piracicaba, São Paulo.

⁽³⁾ Engenheira agrônoma, aluna de pós-graduação UFC, bolsista CAPES, Fortaleza, Ceará.

Bowen (1926), assumiu que os transportes de calor sensível e de vapor d'água são similares, concluindo que a razão entre os coeficientes de difusividade turbulenta de calor sensível (Kh) e latente (Ke) é igual à unidade. Ele relacionou os fluxos de calor sensível (H) e calor latente (LE) da maneira como pode ser visto na equação (01). Esta relação tornou-se conhecida como razão de Bowen (β), e tem sido largamente utilizada em estudos de fluxo de calor, estimativas de evapotranspiração e, também, para estimar a resistência ao fluxo de vapor d'água.

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (01)$$

A estimativa dos fluxos turbulentos de calor latente (LE) e sensível (H), sobre uma superfície pode ser realizada, caso se conheça: R_n =radiação líquida; G =fluxo de calor sensível no solo; $\Delta T'$ = diferença entre as temperaturas indicadas nos termômetros de bulbos úmidos de dois níveis ($T'_2 - T'_1$); ΔT = diferença entre as leituras dos termômetros de dois níveis ($T_2 - T_1$); S = tangente à curva de tensão de saturação de vapor d'água no ponto de temperatura média úmida, i.e., o valor médio de T'_2 e T'_1 ; $\gamma = (c_p \cdot P / O,622 \cdot \lambda)$, é o coeficiente psicrométrico; P = pressão atmosférica local; c_p = calor específico do ar seco a pressão constante ($1.005 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); λ = calor latente de evaporação ($2,45 \text{ MJ.kg}^{-1}$); ρ = massa específica do ar seco ($1,26 \text{ kg.m}^{-3}$). É comum e aceito admitir-se que, durante o tempo de medida, λ e ρ permanecem constantes numa pequena camada de ar estudada. Podendo-se aplicar a equação (02) do balanço de energia.

$$LE = (R_n - G) / (1 + \beta) \quad (02)$$

Com base na hipótese da similaridade, e com a atmosfera próxima das condições de neutralidade, admite-se que: $K_m \cong K_e \cong K_h$. O valor de β , também, pode ser obtido utilizando-se a equação (03), considerando que o coeficiente de transporte turbulento de calor latente (Ke) é igual ao coeficiente de transporte turbulento de calor sensível (Kh), e, considerando-se a umidade específica (q) igual a $0,622 \cdot e_a / P$ (Villa Nova, 1973; Pereira, 1996)

$$b = g \cdot \frac{dT}{de_a} \quad (03)$$

onde: T = temperatura do ar; e_a = pressão parcial ou atual de vapor d'água.

Em situações de campo, é comum medir-se a temperatura do ar e a pressão parcial de vapor d'água em apenas duas alturas acima da superfície estudada. Desta maneira, δT e δe_a são igualados as diferenças ΔT e Δe_a , respectivamente. Essas medidas, quando realizadas em superfícies heterogêneas, devem representar fielmente os parâmetros da superfície estudada. Para tal, Bausch & Bernard (1992), utilizaram um equipamento móvel para coleta de dados, assim o sistema pôde representar a superfície composta pela cultura e pelo solo nu.

Smith (1991), apresenta os objetivos e procedimentos propostos, após ampla revisão realizada pela FAO. É uma proposta que demandará tempo e trabalho para ser alcançada, devendo ser implementada em duas etapas. Na primeira, a grande inovação será a utilização do modelo de Penman-Monteith (Monteith, 1965) como padrão na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), mas a evapotranspiração das culturas continuaria sendo estimada através de coeficientes de cultura e da ET_o. Na segunda etapa, a evapotranspiração das culturas passaria a ser estimada diretamente pelo método de Penman-Monteith, com o emprego de valores adequados para a resistência aerodinâmica e do dossel de cada cultura estudada. Alguns autores, como Ben-Asher et al. (1989), consideram que o modelo de Penman-Monteith apresentará pouco valor prático, caso a resistência da cobertura vegetal não venha a ser parametrizada a partir de propriedades conhecidas e de fácil mensuração da planta, do solo e da atmosfera.

O lisímetro pode apresentar diversos formatos e tamanhos, mas que devem ser baseados no requerimento específico das condições de estudo. Aboukhaled et al. (1982), consideram que o lisímetro permite realizar estimativa da evaporação de água em solo nu e da evapotranspiração das culturas. As estimativas lisimétricas apresentam algumas imperfeições que podem ser amenizadas ou mesmo evitadas. Elas são causadas, em parte, pelas condições artificiais do solo no lisímetro. Outros fatores também podem influir significativamente, como: a descontinuidade entre a vegetação do lisímetro e a da área circundante; a representatividade das medidas obtidas, devido à reduzida dimensão dos lisímetros comumente utilizados e ao regime hídrico diferenciado, muitas vezes encontrado, entre o lisímetro e a área tampão.

A estimativa da evapotranspiração, tanto a potencial, como a real ou de cultivo, quanto a de referência, pode ser extremamente complexa. O evapotranspirômetro quando operado adequadamente, isto é, quando umedecido sem que se permita ocorrer deficiência e/ou excesso de água no tanque e quando exposto homoganeamente dentro de uma área tampão de tamanho adequado para minimizar os efeitos da advecção, é um instrumento que fornece valores seguros de evapotranspiração (Thornthwaite & Mather, 1955).

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em condições de campo, na área experimental da irrigação do Departamento de Engenharia Rural, na Fazenda Areão da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", situada no município de Piracicaba, estado de São Paulo, com latitude de 22° 42' S, longitude 47° 38' W e altitude de 530 metros, aproximadamente.

Segundo a classificação climática de Köppen, Piracicaba possui clima do tipo Cwa, ou seja, subtropical úmido, com estiagem no inverno, temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C e no mês mais quente superior a 22°C. A temperatura média anual é de 21,1°C e a precipitação média anual é de aproximadamente 1250 mm (Ometto, 1989). O solo do local do experimento é classificado como Terra Roxa Estruturada (Alfisol), série Luiz de Queiroz.

Os dados processados e analisados neste trabalho foram os obtidos do dia 1º de novembro ao dia 10 de dezembro de 1996, utilizando-se de uma estação agrometeorológica automática para coleta de dados climáticos, de um lisímetro de pesagem com princípio de célula de carga e de um sistema automático para estimar a razão de Bowen.

Os equipamentos da área experimental foram dispostos sobre uma área com grama batatais (*Paspalum notatum flügge*), com aproximadamente 35 m de largura por 90 m de comprimento, de maneira a obter-se, o mais próximo possível, condições potenciais de evapotranspiração. Esta área teve como objetivo minimizar as decorrências do efeito oásis. Para tal, toda a área cultivada recebeu o mesmo manejo, exceto no que se referiu ao método de aplicação de água, pois o lisímetro recebeu água através de recipiente de volume aferido e a área tampão através de um sistema de gotejamento enterrado. Durante todo o período de coleta de dados, a grama foi mantida com altura de 0,12m \pm 0,03m e isenta de competição com plantas daninhas e pragas.

O equipamento da razão de Bowen, instalado na área experimental, foi calibrado para fornecer valores médios em intervalos de 20 min, de leituras realizadas a cada segundo, e armazenadas em um sistema de aquisição de dados 21X(L), fabricado pela Campbell Scientific. Os braços metálicos, com as entradas de ar e termopares, foram instalados de maneira que o local de sucção do ar e os termopares permanecessem a uma distância vertical de 0,10 m e 1,50 m da superfície gramada.

De posse dos valores de gradientes de temperatura (ΔT), de gradientes de tensão do vapor d'água do ar (Δe_a) e do coeficiente psicrométrico para equipamento com ventilação forçada, efetuou-se os cálculos, de forma a estimar o valor da razão de Bowen (β), com o emprego da equação 03, para cada intervalo de tempo correspondente a 20 minutos.

Após a estimativa da razão de Bowen para cada intervalo de tempo, e de posse dos valores da radiação líquida (R_n) e do fluxo de calor sensível no solo (G), foi possível realizar a estimativa do calor latente de evaporação (LE), através da equação (02). E, com o valor de LE foi possível calcular o valor da evapotranspiração de referência (ET_o), em mm, para cada intervalo de tempo de 20 minutos, em todo o período de tempo estudado.

O lisímetro de pesagem foi constituído de um tanque de cimento amianto com profundidade de 0,65 m, comprimento de 1,20 m e largura de 0,85 m. No preenchimento do lisímetro foi utilizado solo de cada camada do perfil original, de tal forma que as condições naturais fossem obtidas com maior semelhança possível. Embora a estrutura do solo tenha sido deformada, a seqüência e profundidade dos horizontes originais foram mantidas.

As informações climáticas foram obtidas através do uso de uma estação agrometeorológica automática, instalada na própria área experimental. Utilizando-se de um sistema de aquisição de dados (modelo CR 10), fabricado pela Campbell Scientific, foi possível registrar estes dados de forma contínua, permitindo armazenar valores médios das informações climáticas para cada 30 min, das leituras realizadas a cada segundo. Outro equipamento semelhante foi empregado para mensurar e armazenar o sinal das células de carga do lisímetro nos mesmos intervalos de tempo.

Como os dados da estação agrometeorológica e do lisímetro foram armazenados para cada intervalo de 30 minutos e os do equipamento automático da razão de Bowen para intervalos de 20 minutos, foram realizados cálculos de média e de integração de períodos para que os intervalos se iguallassem, permitindo comparações entre as estimativas dos diferentes equipamentos. Então, para o lisímetro e para a estação estas operações foram realizadas a cada dois intervalos e no equipamento da razão de Bowen a cada três, assim obteve-se intervalos de 1 hora, para cada um dos 3 sistemas.

Para emprego do método de Penman-Monteith pode-se utilizar a equação proposta por Monteith (1965), que pode ser expressa da seguinte maneira:

$$LE = \frac{S.(Rn - G) + \frac{r.c_p.\Delta e}{ra}}{S + g.(1 + \frac{rc}{ra})} \quad (04)$$

onde: LE=fluxo de calor latente de evaporação ($W.m^{-2}$); Rn=radiação líquida ($W.m^{-2}$); G=fluxo de calor sensível no solo ($W.m^{-2}$); ρ =massa específica do ar atmosférico $\cong 1,26 \text{ kg.m}^{-3}$; c_p =calor específico do ar a pressão constante ($J.kg^{-1}.\text{°C}^{-1}$); Δe =déficit de vapor d'água a temperatura do ar, es - ea, (kPa); rc= resistência da cobertura vegetal ($s.m^{-1}$); ra=resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível e calor latente de evaporação ($s.m^{-1}$); γ =coeficiente psicrométrico $\cong 0,0626 \text{ kPa} .\text{°C}^{-1}$; S=inclinação da tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água, no ponto dado pela temperatura do ar ($kPa.\text{°C}^{-1}$). Os parâmetros climáticos foram calculados de acordo com a padronização proposta pela FAO/1991 (Smith, 1991; Pereira et al., 1997), devido sua grande aceitação e facilidade de manipulação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A evapotranspiração de referência foi estimada pelo balanço de energia, realizado com os dados obtidos com o equipamento da razão de Bowen (ET_{oBR}), pelo modelo Penman-Monteith (ET_{oPM}) padronizado pela FAO/1991, tendo como referência as informações climatológicas da estação agrometeorológica automática e através do lisímetro de pesagem (ET_{oL}).

A resposta apresentada pelo lisímetro é a diferença de peso entre um intervalo e o anterior. Como a evapotranspiração provoca perda de massa, a cada intervalo é possível obter o valor de ET_o . Estes valores foram analisados cuidadosamente, com a finalidade de eliminar-se todos os valores ocasionados devido às precipitações, irrigações e drenagens. Então, para efeito de ET_o foram considerados apenas os valores negativos dos intervalos de 30 minutos, exceto os ocasionados pelas drenagens.

Os três métodos de estimativa de ET_o foram comparados estatisticamente, entre si, pelo coeficiente de determinação (r^2) da regressão linear simples. Mas como a análise isolada de r^2 pode conduzir à interpretações impróprias, avaliou-se também o índice de concordância (id) obtido com a análise proposta por Willmott (1981).

Foram selecionados os dias do período de 1º a 10 de dezembro, quando os equipamentos trabalharam com a menor interferência possível de fatores externos, principalmente de precipitações. Sendo selecionados os dias 02, 05, 06, 08 e 09 de dezembro, em intervalos de 1 hora.

As análises estatísticas, regressão linear simples e índice de concordância de Willmott, entre os três métodos de estimativa de ET_o estudados, demonstraram que todos os métodos foram muito eficientes na estimativa horária de ET_o . Pois, os valores calculados para r^2 e id foram bastante significativos (Tabela 1). Na comparação entre ET_{oL} e ET_{oPM} , o menor valor alcançado para r^2 foi de aproximadamente 0,83 e atingiu um valor máximo de aproximadamente 0,93, com média para os 5 dias analisados de 0,89. E, o valor de id apresentou-se no intervalo de 0,95 a 0,98, com a média sendo 0,97. Já, na comparação entre os valores de ET_{oL} e ET_{oBR} , os valores de r^2 e de id foram um pouco inferiores aos obtidos na análise anterior, embora eles possam ser considerados muito bons, considerando que a estimativa foi realizada a cada hora do dia, r^2 variou de 0,70 a 0,89, e teve média de 0,83, aproximadamente. O id teve 0,97 como valor médio.

Tabela 1 - Valores de id e de r^2 calculados com a comparação de ET_{oL} versus ET_{oPM} , ET_{oL} versus ET_{oBR} e ET_{oPM} versus ET_{oBR} , nos dias 02, 05, 06, 08 e 09 de dezembro de 1996.

Dia	ET_{oL} x ET_{oPM}		ET_{oL} x ET_{oBR}		ET_{oPM} x ET_{oBR}	
	r^2	id	r^2	id	r^2	id
02/dez	0,93	0,98	0,86	0,95	0,95	0,98
05/dez	0,93	0,98	0,86	0,95	0,96	0,99
06/dez	0,90	0,97	0,89	0,97	0,97	0,99
08/dez	0,83	0,95	0,70	0,90	0,96	0,98
09/dez	0,88	0,97	0,83	0,95	0,94	0,98
Média	0,89	0,97	0,83	0,94	0,96	0,98

Os resultados mais significativos foram obtidos com a comparação entre os valores de ET_{oPM} e ET_{oBR} , demonstrando grande aderência dos processos de estimativas proposto pela FAO/1991 e do equipamento da razão de Bowen, obtendo-se valores de r^2 no intervalo de 0,94 a 0,97, a média alcançada foi de 0,96. O id, também, apresentou excelentes resultados, sendo seu valor médio igual a 0,98, aproximadamente.

CONCLUSÕES

O sistema automático da razão de Bowen teve desempenho adequado na estimativa da ET_o tanto na escala diária como na horária, apresentou baixa manutenção e fácil manuseio. Podendo ser recomendado para diversos estudos em substituição aos lisímetros, que são equipamentos de baixíssima mobilidade em campo. E, finalmente, é um instrumento que poderá ser útil na estimativa de rc para muitas espécies vegetais agricultáveis, em seus variados estágios de desenvolvimento vegetativo, com a finalidade de estimar valores médios coerentes e passíveis de serem aplicados na equação de Penman-Monteith.

Na escala horária, as maiores correlações foram obtidas quando se comparou a ET_o estimada pela metodologia FAO/1991 com a estimativa realizada com o equipamento da razão de Bowen. O valor médio para r^2 da análise dos dias 02, 05, 06, 08 e 09 de dezembro de 1996, foi de 0,96 e a média para id foi de 0,98. Demonstrando elevada correlação entre as metodologias, portanto suas estimativas podem ser aplicadas em pesquisas científicas como padrão na estimativa de ET_o .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO, 1982. 68 p. (Irrigation and drainage, paper n° 39)
- BAUSCH, W. C.; BERNARD, T. M. Spatial averaging bowen ratio system: description and lysimeters comparison. Chicago: **Trans. of the ASAE**, Saint Joseph, vol. 35, n° 1, p. 121-128, 1992.

- BEN-ASHER, J.; MEEK, D. W.; HUTMACHER, R. B.; PHENE, C. J. Computational approach to assess actual transpiration from aerodynamic and canopy resistance. Madison: **Agronomy Journal**, vol. 81, n° 5, p. 776-782, sep/oct 1989.
- BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. Ithaca: **Phys. Rev. Ser.**, vol. 2, n° 27, p.779-787, 1926.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. London: **Symposium of the Society for Experimental Biology**, vol. 19, p. 205-234, 1965.
- OMETTO, J. C. **Registros e estimativas de parâmetros meteorológicos da região de Piracicaba, SP**. Piracicaba: FEALQ, 1989. 76 p.
- PEREIRA, A. R. **Introdução a micrometeorologia**. Piracicaba: ESALQ / USP, 1996. 70 p.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDYIAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ / USP, 1997. 183 p.
- SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45 p.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.
- VILLA NOVA, N. A. Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz. Piracicaba, 1973. 78p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**. vol. 2, p. 184-194, 1981.