

## DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO DOSSEL DA GRAMA PARA AS CONDIÇÕES DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

## GRASS CANOPY RESISTANCE EVALUATION FOR THE CONDITIONS OF POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION

José Geanini Peres<sup>1</sup>, Antonio Roberto Pereira<sup>2</sup>, José Antonio Frizzone<sup>3</sup> e Nilson Augusto Villa Nova<sup>2</sup>.

### RESUMO

Estimou-se a resistência do dossel ( $r_c$ ) para grama (*Paspalum notatum flügge*) apropriada à determinação de evapotranspiração potencial através do modelo de Penman-Monteith. Observou-se que  $r_c$  situou-se na faixa de 60 a 80  $s.m^{-1}$ , havendo indicações de que 80  $s.m^{-1}$  é o valor de  $r_c$  que melhor representa as condições de evapotranspiração potencial. Verificou-se, também, que as estimativas mensais da evapotranspiração potencial foram mais consistentes com as medidas em lisímetros de drenagem do que as de periodicidade decendial.

**Palavras-chave:** resistência do dossel, evapotranspiração, modelo de Penman-Monteith.

### SUMMARY

The canopy resistance ( $r_c$ ) for grass (*Paspalum notatum flügge*) appropriate to estimate the potential evapotranspiration by the Penman-Monteith model was evaluated. It was observed that  $r_c$  fell in the range of 60 to 80  $s.m^{-1}$ , however the best performance resulted when  $r_c$  got the value of 80  $s.m^{-1}$ . Also, it was verified that monthly estimates were more consistent with the measured value in drainage lysimeter than at the 10-day time scale.

**Key words:** canopy resistance, evapotranspiration, Penman-Monteith model.

---

<sup>1</sup>Prof. Dr. do Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental, CCA/UFSCar, Araras-SP., CEP

13416-510.

<sup>2</sup>Prof. Associado do Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ/USP, Piracicaba-SP, CEP 13418-900.

<sup>3</sup>Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP, Piracicaba-SP, CEP 13418-900.

## INTRODUÇÃO

O modelo de Penman-Monteith-MPM (MONTEITH, 1965) é considerado como aquele de melhor desempenho entre os modelos combinados e recomendado como padrão para estimativa da evapotranspiração e para calibração de modelos empíricos (SMITH, 1991).

O MPM, embora tenha sua formalização teórica rigorosamente física, seja de fácil entendimento e demande para sua utilização de informações meteorológicas padronizadas coletadas em um único nível, tem sua aplicação limitada pela dificuldade de se conseguir valores confiáveis e representativos da resistência do dossel (HATFIELD, 1988; LUCHIARI Jr & RIHA, 1991; OKE, 1992).

A resistência do dossel ( $r_c$ ) de uma cultura pode ser estimada a partir de medidas diretas da resistência estomática média, obtida através de porômetros de difusão, e do índice de área foliar (IAF), estimado por amostragem. No entanto, esta é uma tarefa árdua e demorada, razão pela qual, dentro dos limites dos erros experimentais, ela é normalmente determinada como resíduo da aplicação do MPM, bastando, para tanto, se conhecer o valor da evapotranspiração, via lisímetro, por exemplo, e as variáveis climáticas envolvidas no processo (SHARMA, 1983; MONTEITH, 1985; LUCHIARI Jr & RIHA, 1991; OKE, 1992).

Adotando  $r_c = 0 \text{ s.m}^{-1}$ , para definir que a evapotranspiração se dava à taxa potencial, SLABBERS (1977) estimou as necessidades hídricas da beterraba, girassol, alfafa e trigo, obtendo boa correlação com os valores medidos em lisímetros de drenagem e pelo balanço de água no solo.

Segundo HATFIELD (1988), os valores conhecidos de  $r_c$  para as diferentes culturas variam em torno de  $20 \text{ s.m}^{-1}$  para solos próximos à capacidade de campo, aumentando à medida que a umidade do solo diminui.

MONTEITH (1985) sugere a adoção de  $r_c = 50 \text{ s.m}^{-1}$  para determinação da evapotranspiração potencial das plantas cultivadas em geral, valor este que concorda com os apresentados por OKE (1992): grama  $70 \text{ s.m}^{-1}$ , culturas  $50 \text{ s.m}^{-1}$  e florestas  $80$  a  $150 \text{ s.m}^{-1}$ . Por sua vez, SMITH (1991) sugere a utilização de  $r_c = 69 \text{ s.m}^{-1}$  para estimar a evapotranspiração potencial da grama através do modelo de Penman-Monteith.

Treze modelos combinados foram testados por ALLEN (1985) para estimativa da evapotranspiração potencial da grama, em duas localidades de climas opostos - árido e úmido - e comparados os resultados obtidos com leituras lisimétricas locais. O MPM, no qual foi utilizado  $r_c = 50 \text{ s.m}^{-1}$ , apresentou excelente desempenho estimativo, enquanto que, quando se considerou  $r_c = 0 \text{ s.m}^{-1}$ , as estimativas não apresentaram boa correlação com valores medidos nos lisímetros.

ALLEN et al. (1989) investigaram cinco formas distintas da equação de Penman utilizando

informações meteorológicas e lisimétricas coletadas em 11 diferentes localidades, situadas em latitudes variando de 56°S (Austrália), passando por 0°N (Zaire), até 56°N (Dinamarca) e abrangendo condições climáticas desde o úmido até o árido. O MPM, quando se adotou  $r_c = 69 \text{ s.m}^{-1}$  para grama, foi aquele que apresentou as estimativas mais consistentes e correlacionadas com os valores medidos, em termos diários e mensais. Nesta última periodicidade o erro padrão da estimativa e o coeficiente de correlação médios foram, respectivamente,  $0,36 \text{ mm.dia}^{-1}$  e 0,99.

Este estudo objetiva definir o valor da resistência do dossel para grama (*Paspalum notatum flügge*) para as condições de evapotranspiração potencial.

## MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi realizada a partir de informações de evapotranspiração potencial para grama (*Paspalum notatum flügge*) (ETo) coletadas em lisímetros de drenagem instalados na estação experimental do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) localizada em Campinas (22°54'S; 47°04'W; 670 m), Estado de São Paulo (CAMARGO, 1966).

Pela classificação climática de Köppen, Campinas apresenta clima subtropical com inverno seco (Cwa).

Os lisímetros foram operados de forma a manter o solo sua na capacidade de campo, assegurando-se, assim, a obtenção da evapotranspiração na sua forma potencial como definido por DOORENBOS & PRUITT (1975). A ETo foi coletada em base decendial e posteriormente processada em termos mensais, uma vez que o equipamento utilizado não possuía sensibilidade suficiente à obtenção de valores diários. O período de coleta foi 1956-59.

A expressão matemática do modelo de Penman-Monteith utilizada para estimar ETo foi a seguinte:

$$ET_{oM} = \frac{I}{I} \left[ \frac{\Delta(R_n - G) + f p c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + I \left( 1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \right] \quad (1)$$

onde  $ET_{oM}$  é a evapotranspiração potencial para grama, segundo o modelo de Penman-Monteith ( $\text{mm.dia}^{-1}$ );  $\gamma$

o calor latente de vaporização da água ( $\text{MJ.kg}^{-1}$ );  $\Delta$  a tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água ( $\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$ );  $R_n$  a densidade de fluxo de radiação solar líquida ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ );  $G$  a densidade de fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ );  $r$  a massa específica do ar ( $\text{kg.m}^{-3}$ );  $c_p$  o calor específico do ar à

pressão constante ( $\text{MJ.kg}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $e_s$  a pressão de saturação do vapor d'água (kPa);  $e_a$  a pressão atual do vapor d'água (kPa);  $\gamma$  a constante psicrométrica ( $\text{kPa}^{-1}\text{.}^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $r_c$  a resistência do dossel ( $\text{s.m}^{-1}$ );  $r_a$  a resistência aerodinâmica ( $\text{s.m}^{-1}$ ) e  $f$  o fator de conversão ( $86400 \text{ s.dia}^{-1}$ ).

Como a ordem de grandeza da variação da densidade de fluxo de calor no solo ( $G$ ), para períodos iguais ou superiores a 10 dias, é suficientemente pequena, ela foi desconsiderada nos cálculos de EToM (JENSEN, 1973; PEREIRA, 1990 e SMITH, 1991).

A resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível e vapor d'água foi obtida a partir da expressão (ALLEN et al., 1989):

$$r_a = \frac{\text{Ln} \left[ \frac{z_m - d}{z_{om}} \right] \text{Ln} \left[ \frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 U_z} \quad (1)$$

onde Ln é o logaritmo neperiano;  $r_a$  a resistência aerodinâmica ( $\text{s.m}^{-1}$ );  $z_m$  a altura de medição da velocidade do vento (m);  $z_h$  a altura de medição da temperatura e da umidade do ar (m);  $d$  o deslocamento do plano zero do perfil do vento (m);  $z_{om}$  o comprimento de rugosidade equivalente para transferência de momento (m);  $z_{oh}$  o comprimento de rugosidade equivalente para transferência de calor sensível e latente (m);  $k$  a constante de von Karman ( $k = 0,41$ ) e  $U_z$  a velocidade do vento medida à altura  $z$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ).

BRUTSAERT (1982) sugere que  $d$ ,  $z_{om}$  e  $z_{oh}$  podem ser calculados em função da altura média da vegetação ( $h_c$ ), dada em metros, a partir das expressões:

$$d = \frac{2}{3} h_c \quad (2)$$

$$z_{om} = 0,123 h_c \quad (3)$$

$$z_{oh} = 0,0123 h_c \quad (4)$$

Tomando-se a altura média da grama como 0,12 m (DOORENBOS & PRUITT, 1975; SMITH, 1991) e substituindo-se este valor em (3), (4) e (5) se tem que  $d = 0,08 \text{ m}$ ,  $z_{om} = 0,01476 \text{ m}$  e  $z_{oh} = 0,001476 \text{ m}$ .

Padronizando-se a leitura da velocidade do vento, da temperatura e da umidade para a altura  $z = 2 \text{ m}$  e substituindo-se os valores de  $d$ ,  $z_{om}$  e  $z_{oh}$  em (2) se obtém:

$$r_a = \frac{208}{U_2} \quad (5)$$

onde:  $U_2$  é a velocidade do vento à altura de 2 m ( $\text{m.s}^{-1}$ ).

Na literatura especializada não se tem uma definição clara do valor da resistência do dossel ( $r_c$ ) que represente as condições de evapotranspiração potencial. No geral, são encontrados valores de  $r_c$  na faixa de 0 a  $80 \text{ s.m}^{-1}$ , razão pela qual nessa simulação foram utilizados valores de  $r_c$  da seguinte ordem de grandeza: 0, 20, 40, 60 e  $80 \text{ s.m}^{-1}$ .

Todas as grandezas presentes em (1) foram estimadas através dos algoritmos apresentados por SMITH (1991), a exceção da densidade de fluxo da radiação solar líquida ( $R_n$ ) que foi obtida a partir das relações empíricas estabelecidas por OMETTO (1981) para as condições climáticas médias do Estado de São Paulo.

A metodologia utilizada para comparação dos resultados foi proposta por ALLEN et al. (1989) e fundamenta-se no erro padrão da estimativa ( $s$ ), calculado como segue:

$$s = \left( \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n - 2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

onde:  $y$  é a ETo;  $\hat{y}$  a EToM estimada para os diferentes valores de  $r_c$  e  $n$  o número de observações.

A hierarquização de  $r_c$  foi feita com base nos valores do erro padrão da estimativa ( $s$ ), do coeficiente de correlação ( $r$ ) e do coeficiente angular ( $b$ ) das respectivas regressões. A melhor alternativa é aquela que apresentar maior  $r$ , menor  $s$  e  $b$  próximo da unidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 estão apresentados os parâmetros estatísticos relativos às equações de regressão linear simples entre ETo e EToM, considerando-se nesta última diferentes valores para a resistência do dossel, para as periodicidades decenal e mensal. As representações gráficas destes modelos estatísticos estão nas Figuras 1 e 2.

Pelos indicadores da Tabela 1 pode ser detectado o bom ajustamento entre os valores medidos e estimados, com melhores resultados na escala mensal do que na decencial. Em termos médios, na escala mensal, o coeficiente de correlação (r) e o erro padrão da estimativa (s) foram da ordem de 0,91, significativo ao nível de 1% de probabilidade, e de 0,42 mm.dia<sup>-1</sup>. escala decencial estes valores foram, respectivamente, 0,81 e 0,69 mm.dia<sup>-1</sup>. Estas determinações estatísticas confirmam os resultados obtidos por ALLEN (1985) e ALLEN et al. (1989) na utilização deste modelo para estimativa da evapotranspiração potencial. A maior dispersão das estimativas de ETo verificada na escala decencial, traduzida em coeficientes de correlação mais baixos e erros padrões da estimativa mais elevados, pode ser explicada pela inércia apresentada pelos lisímetros, no que se refere a sua drenagem, caracterizada pela retenção temporária da água livre no perfil do solo.

Tabela 1 - Número de observações (n), coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), erro padrão da estimativa (s) e coeficiente de correlação (r) para as equações de regressão linear simples entre a evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), em Campinas-SP. Período de 1956-59.

	n	a	b	s	r
Periodicidade Decencial					
EToM <sub>00</sub>	142	16,40 <sup>1</sup>	0,91 <sup>2</sup>	8,17	0,785 <sup>2</sup>
EToM <sub>20</sub>	142	15,25 <sup>1</sup>	0,87 <sup>2</sup>	7,50	0,797 <sup>2</sup>
EToM <sub>40</sub>	142	14,25 <sup>1</sup>	0,84 <sup>2</sup>	6,96	0,806 <sup>2</sup>
EToM <sub>60</sub>	142	13,38 <sup>1</sup>	0,80 <sup>2</sup>	6,53	0,812 <sup>2</sup>
EToM <sub>80</sub>	142	12,60 <sup>1</sup>	0,77 <sup>2</sup>	6,17	0,817 <sup>2</sup>
Periodicidade Mensal					
EToM <sub>00</sub>	48	39,42 <sup>1</sup>	1,03 <sup>2</sup>	15,83	0,891 <sup>2</sup>
EToM <sub>20</sub>	48	36,39 <sup>1</sup>	0,98 <sup>2</sup>	14,44	0,899 <sup>2</sup>
EToM <sub>40</sub>	48	33,77 <sup>1</sup>	0,94 <sup>2</sup>	13,32	0,906 <sup>2</sup>
EToM <sub>60</sub>	48	31,48 <sup>1</sup>	0,96 <sup>2</sup>	12,42	0,910 <sup>2</sup>
EToM <sub>80</sub>	48	29,47 <sup>1</sup>	0,87 <sup>2</sup>	11,69	0,914 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> = significativo a 5% de probabilidade  
<sup>2</sup> = significativo a 1% de probabilidade

A combinação EToM<sub>00</sub> ( $r_c = 0 \text{ s.m}^{-1}$ ), que representa as condições de evaporação de uma superfície de água livre, apresentou estimativas menos correlacionadas com os valores medidos, confirmando os resultados de JACKSON et al. (1981), JACKSON (1983), MONTEITH (1985) e ALLEN (1985). Estes autores concluíram que, mesmo em condições ótimas de umidade, as plantas ainda apresentam  $r_c$  mensuráveis, contrapondo-se, no entanto, com SLABBERS (1977), que sustenta não haver qualquer controle pela planta, via estômatos, do seu consumo de água, enquanto o solo estiver bem suprido de água.

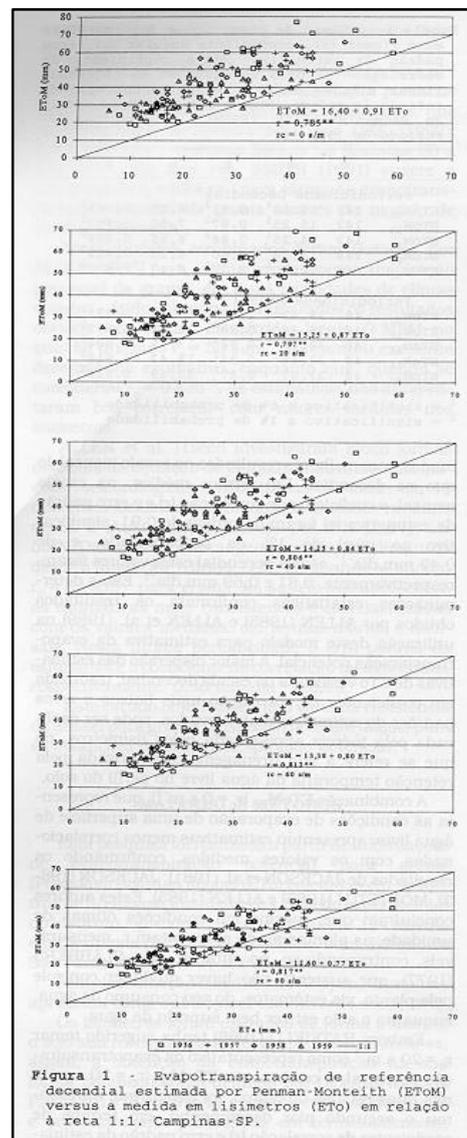
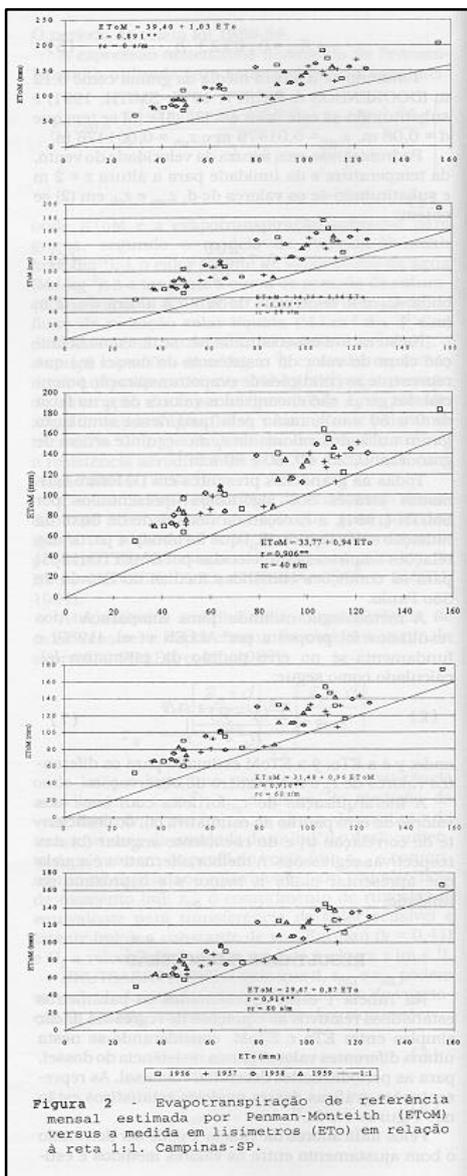
Embora HATFIELD (1988) tenha sugerido tomar  $r_c = 20 \text{ s.m}^{-1}$  como representativo da evapotranspiração potencial, a combinação EToM<sub>20</sub> ( $r_c = 20 \text{ s.m}^{-1}$ ), nas duas escalas de tempo, foi aquela

que apresentou o segundo pior desempenho, em termos de coeficientes de correlação ( $r$ ) e erro padrão da estimativa ( $s$ ), evidenciando que este valor de  $r_c$  é muito baixo para representar as condições potenciais de evapotranspiração, o que concorda com MONTEITH (1985), que sugere um valor mínimo de  $r_c = 50 \text{ s.m}^{-1}$  para definir esta condição limite.

Pela Tabela 1 verifica-se que as combinações EToM<sub>40</sub>, EToM<sub>60</sub> e EToM<sub>80</sub> foram aquelas que forneceram os melhores indicadores estatísticos (maiores coeficientes de correlação e menores valores para o erro padrão da estimativa) entre os valores medidos e estimados. Os acréscimos verificados nestes indicadores são marginais em relação aos acréscimos muito maiores dados à resistência do dossel, principalmente acima de  $60 \text{ s.m}^{-1}$ , sinalizando que a resistência do dossel, que representa as condições de evapotranspiração potencial situa-se na faixa de  $60\text{-}80 \text{ s.m}^{-1}$ , o que vem referendar os números citados por ALLEN (1985), MONTEITH (1985), ALLEN et al. (1989), SMITH (1991) e OKE (1992). Saliente-se, no entanto, que a combinação EToM<sub>80</sub> foi aquela que gerou o coeficiente de correlação mais alto e o erro padrão da estimativa mais baixo, nas duas escalas de tempo, embora o coeficiente angular da regressão tenha se afastado da unidade mais do que nas demais combinações estudadas.

As Figuras 1 e 2 mostram que o MPM superestimou ETo nas duas escalas de tempo estudadas. Este fato pode ser explicado pela utilização nos cálculos de temperaturas anormalmente elevadas pelo processo de urbanização verificado junto à estação climatológica (CAMARGO, 1966). No entanto, pode ser observado que ocorre uma melhoria crescente no nível de concordância entre os valores medidos e estimados, à medida que se aumenta o valor da resistência do dossel. A combinação EToM<sub>80</sub> ( $r_c = 80 \text{ s.m}^{-1}$ ) foi a que apresentou melhor concordância entre os valores medidos e estimados, caracterizada por um alinhamento bastante próximo da reta 1:1, ocorrendo o processo inverso com as combinações EToM<sub>00</sub> e EToM<sub>20</sub>, que superestimaram ETo de forma acentuada, afastando-se da reta 1:1.

Pela Tabela 1 e Figuras 1 e 2 pode ser observado que os indicadores estatísticos e a concordância entre os valores medidos e estimados melhoram, embora de forma marginal, à medida que a resistência de dossel aumenta de valor. Assim, tomando-se a resistência do dossel como incógnita do modelo (equação 1), obtém-se para a mesma um valor médio de  $365 \text{ s.m}^{-1}$  nos meses de abril a setembro (outono-inverno); de  $241 \text{ s.m}^{-1}$  de outubro a março (primavera-verão), passando por um valor médio anual de  $303 \text{ s.m}^{-1}$ . Estes números, como afirmam BEN-ASHER et al. (1989), não apresentam significado fisiológico, devendo ser considerados tão somente como coeficientes de proporcionalidade de determinação empírica.



## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa permitem concluir que:

- A resistência do dossel ( $r_c$ ) que melhor representa as condições de evapotranspiração potencial para a grama situa-se no intervalo de 60 a 80  $s.m^{-1}$ , havendo indicações de que 80  $s.m^{-1}$  é o valor de  $r_c$  que melhor representa esta condição climatológica.
- Independente do valor da resistência do dossel adotado, as estimativas mensais de ETO, utilizando-se o modelo de Penman-Monteith, são mais consistentes do que as decenais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G. Daily reference evapotranspiration comparisons in arid and humid environment. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, Chicago, 1985. **Proceedings**. St. Joseph, ASAE, 1985. p. 193-200.
- ALLEN, R.G., JENSEN. M. E., WRIGHT, J. L., et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 650-62, 1989.
- BEN-ASHER, J., MEEK, D. W., HUTMACHER, R. B., et al. Computational approach to assess actual transpiration from aerodynamic and canopy resistance. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 776-82, 1989.
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications**. Dordrecht, Kluwer Academic, 1982. 299 p. (Environmental Fluid Mechanics, 1).
- CAMARGO, A. P. **Contribuição para determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agrônomo, 1966. 60 p. (Boletim, 161).
- DOORENBOS, J., PRUITT, J. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome, FAO, 1975. 179 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).
- HATFIELD, J. L. Research priorities in ET: evolving methods. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 31, n. 2, p. 491-95, 1988.
- JACKSON, R. D., IDSO, S. B., REGINATO, R. J., et al. Canopy temperature as crop water stress indicator. **Water Res. Research**, v. 17, n. 4, p. 1133-38, 1981.
- JACKSON, R. D. Canopy temperature and crop water stress. In: HILLEL, D. **Advances in irrigation**. New York, Academic Press, v. 1, p. 43-85, 1983.
- JENSEN, M. E. ed. **Consumptive use of water and irrigation water requirements**. New York, ASCE, 1973. 215 p.
- LUCHIARI Jr, A., RIHA, S. J. Bulk surface resistance and its effect on evapotranspiration rates in irrigated wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, p. 888-95, 1991.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symp. Soc. Exp. Biology**. London, v. 19, p. 205-34, 1965.
- MONTEITH, J. L. Evaporation from land surfaces: progress in analysis and prediction since 1948. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, Chicago, 1985. **Proceedings**. St. Joseph, ASAE, 1985. p. 4-12.
- OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2 ed. London, Routledge, 1992. 435 p.

- OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo, CERES, 1981. 425 p.
- PEREIRA, A. R. **Análise do modelo de Priestley-Taylor para estimativa da evapotranspiração potencial**. Piracicaba, 1990. 68 p. (Livre docência. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP).
- SHARMA, M. L. Estimating evapotranspiration. In: HILLEL, D. **Advances in irrigation**. New York, Academic Press, 1983. V. 3, p. 213-81.
- SLABBERS, P. J. Surface roughness of crops and potential evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 34, p. 181-91, 1977.
- SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for predictions of crop water requirements**. Rome, FAO, 1991. 45 p.