

## **Coefficiente da equação de Makkink para estimativa da evapotranspiração de referência na região de Urussanga, SC.**

## **Coefficient of Makkink equation for estimating reference evapotranspiration in the region of Urussanga, SC.**

Álvaro José Back<sup>1</sup>

### **Resumo**

Com os valores de evapotranspiração de referência calculados pelo método de Penman-Monteith para Urussanga (SC), foram ajustados os valores mensais e anuais dos coeficientes da equação de Makkink. Com os valores obtidos corrige-se a tendência observada de subestimativa da evapotranspiração pelo método de Makkink, com erro padrão de estimativa inferior a 0,13 mm, 0,20 mm, 0,25 mm e 0,61 mm para os cálculos em escalas mensais, decendial, quinquidial e diária, respectivamente.

**Palavras Chave:** Irrigação, balanço hídrico, evapotranspiração.

### **Abstract**

With the values of reference evapotranspiration calculated by the method of Penman-Monteith for Urussanga (SC), the monthly and annual values of the coefficients of the Makkink's equation had been adjusted. With the gotten values it is corrected tendency of esteem lesser values of evapotranspiration with the Makkink's equation, with error standard lesser then e 0,13 mm, 0,20 mm, 0,25 mm and 0.61 mm for the calculations in scales monthly, ten days, five days and daily, respectively.

**Words Key:** Irrigation, water budget, evapotranspiration.

### **Introdução**

A estimativa da evapotranspiração é importante no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação. Existem diversos métodos de estimativa da evapotranspiração, sendo largamente difundido o emprego de métodos empíricos, resultantes de correlações com fatores meteorológicos. Penman (1948) apresentou um método de estimativa de evapotranspiração com base física, combinado os processos de balanço de energia e de transferência turbulenta, utilizando dados de radiação solar, temperatura, umidade relativa e vento. O método de Penman foi aperfeiçoado derivando no método de Penman-Monteith, detalhadamente descrito por Allen et al (1998), Smith (1991). A escolha de um método depende da precisão desejada e dos dados meteorológicos disponíveis. Vários trabalhos (Allen, 1986; Allen et al. 1989; Peres, 1994; Sedyama, 1996; Pereira 1998) mostram que o método de Penman-Monteith (PM) é mais confiável para as estimativas de ETo. Segundo Sedyama (1996), o método de Penman-Monteith apresenta a vantagem de proporcionar bons resultados tanto em termos

---

<sup>1</sup> Eng. Agrônomo, Dr. Engenharia, Pesquisador da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina -Epagri, Professor da Universidade do Extremo Sul Catarinense -Unesc; E-mail [ajb@unesc.net](mailto:ajb@unesc.net).

horários quanto em diários e também é preferível utilizar o método de Penman-Monteith aos dados lisimétricos quando estes são de qualidade duvidosa. A desvantagem dos métodos combinados é a exigência de dados meteorológicos nem sempre disponíveis. Segundo Pereira et al. (1997) muitos métodos empíricos desenvolvidos e calibrados localmente produzem melhores resultados do que aqueles mais genéricos e fisicamente mais reais.

As equações empíricas para estimativa de ETo utilizam dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento. Dado que a radiação solar é o principal elemento meteorológico que afeta evapotranspiração, os métodos empíricos baseados na radiação solar tendem a dar bons resultados. O método da radiação é recomendado para locais em que existem observações de temperatura, insolação ou radiação e ausência de observação de vento e umidade do ar.

Makkink (1957) estabeleceu a equação para estimativa baseados na correlação de dados de evapotranspiração potencial de um gramado e a radiação solar ao nível da superfície com a seguinte expressão:

$$ETP = 0,61 W R_s - 0,12 \quad [1]$$

onde: ETP = evapotranspiração potencial diária (mm/dia)

$R_s$  = radiação solar ao nível de superfície, expressa em equivalente de evaporação (mm/dia);

$W$  = fator de ponderação dependente do bulbo molhado ( $T_w$ ) e do coeficiente psicrométrico ( $\gamma$ ), que pode ser calculado por meio das equações propostas por Wilson e Rouse (1972) e Viswanadham et al. (1991) conforme:

$$W = 0,407 + 0,0145 T_w \quad \text{para } 0 < T_w < 16 \text{ }^\circ\text{C} \quad [2]$$

$$W = 0,483 + 0,01 T_w \quad \text{para } 16,1 < T_w < 32 \text{ }^\circ\text{C} \quad [3]$$

Segundo Pereira et al. (1997), quando  $T_w$  não é disponível, condição mais comum, utiliza-se a temperatura média diária ( $T_{med}$ ), no entanto em condições de atmosfera não saturada a  $T_{med} > T_w$ , logo  $W$  será ligeiramente maior aumentando a estimativa de ETP

Back e Rosso (2006) avaliando diversos métodos de estimativa de evapotranspiração baseados na radiação solar por meio de índice de desempenho proposto por Camargo e Sentelhas (1997) observaram que o método de Makkink embora classificado como muito bom, tende a subestimar os valores de ETo em todos os meses do ano, estimando 85,9 % do valor de evapotranspiração anual estimado pelo método de Penman-Monteith. Estes autores encontraram coeficiente de determinação  $R^2$  acima de 0,93, para a estimativa de ETo entre o método de Makkink e o método de Penman-Monteith indicando que com ajustes nos coeficientes podem-se melhorar as estimativas deste método. Dessa forma este trabalho teve como objetivo o ajuste do método de Makkink para a região de Urussanga, SC.

## Material e Métodos

Foram utilizados os dados diários de temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e insolação registrados na estação meteorológica de Urussanga-SC (Latitude 28°31'S, longitude 49°19'W) do período de 1981 a 2005.

Foram calculadas as médias das variáveis meteorológicas para intervalos diários, quinquidiais, decendiais e mensais. Nos meses com 31 dias o último período do mês foi calculado com um dia a mais, e no mês de fevereiro com um ou dois dias a menos, conforme se o ano era bissexto ou não. Com as médias das variáveis meteorológicas para cada período considerado calculou-se da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith de acordo com a equação:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad [4]$$

em que:  $ET_o$  = evapotranspiração de referência (  $\text{mm d}^{-1}$ );

$R_n$  = saldo de radiação a superfície (  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

$G$  = fluxo de calor sensível no solo (  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

$T$  = temperatura média do ar a 2 m de altura (  $^{\circ}\text{C}$ );

$U_2$  = velocidade do vento a 2 m de altura (  $\text{m s}^{-1}$ );

$e_s$  = pressão de saturação de vapor (  $\text{kPa}$ );

$e_a$  = pressão atual e vapor (  $\text{kPa}$ );

$\Delta$  = declividade da curva de pressão de saturação (  $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

$\gamma$  = constante psicrométrica (  $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

Os cálculos foram realizados conforme descrito por Allen et al. (1998), sendo que a temperatura média diária foi estimada como a média entre a temperatura máxima e mínima no dia.

Para a estimativa dos coeficientes da equação de Makkink foram realizadas regressões com os valores de  $ET_o$  estimados pelo método de Penman-Monteith e os valores de  $W R_s$ , utilizando o modelo de regressão linear como:

$$ET_o = a + bW R_s \quad [5]$$

O termo  $W$  foi estimado com as equações 2 e 3 adotando a temperatura média do ar no lugar de  $T_w$

A radiação solar que atinge a superfície foi estimada por:

$$R_s = \left( 0,25 + 0,50 \frac{n}{N} \right) R_a \quad [6]$$

em que:  $R_s$  = radiação solar que atinge a superfície (  $\text{mm d}^{-1}$ );

$n$  = insolação horária (h)

$N$  = duração máxima do brilho solar (h)

$R_a$  = Radiação solar no topo da atmosfera (  $\text{mm d}^{-1}$ ).

A radiação solar que atinge o topo da atmosfera ( $R_a$ ) e a duração máxima do brilho solar ( $N$ ) foram calculadas conforme Smith (1991), para o dia compreendido no meio do intervalo (3°, 5° e 15° dia para os intervalos de quinquídios, decendios e mensal, respectivamente).

Para avaliar o desempenho da equação ajustada foram considerados os coeficientes de determinação  $R^2$  e o erro padrão de estimativa (Epe).

## Resultados e Discussão

Na Tabela 1 estão apresentados os valores dos coeficientes da regressão ajustados para os valores mensais bem como do valor médio anual. Pelos valores do coeficiente de determinação  $R^2$  observa-se que as melhores equações são obtidas nos meses outubro a abril e piores nos meses de maio a setembro ( $R^2 < 0,80$ ). Para a regressão mensal foram obtidos os coeficientes  $a = 0,811$  e  $b = -0,610$ , com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,984$ . O erro padrão de estimativa é de  $0,129$  mm, inferior ao valor do erro padrão de estimativa de  $0,577$  mm obtido por Back e Rosso (2006) com a equação original de Makkink. Segundo Pereira et al. (1997) os valores de  $a = 0,61$  e  $b = -0,12$  mm foram obtidos por Makkink para Wageningen, na Holanda e podem variar de local.

Nas Tabelas 2 são apresentados os valores dos coeficientes da equação ajustados para dados de evapotranspiração em intervalos de dez, cinco e um dia, respectivamente. Observa-se que o erro padrão de estimativa aumenta para os valores calculados em intervalos menores. Para as regressões anuais foram observados os erros padrões de estimativa de  $0,129$  mm,  $0,172$  mm,  $0,221$  mm e  $0,609$  mm quando calculado em intervalos mensais, decendiais, quinquidiais e diários respectivamente. Cunha e Bergamaschi (1994) encontraram valores superiores, respectivamente de  $0,59$ mm,  $0,81$ mm,  $1,03$  mm e  $1,73$  mm para cálculos nas mesmas escalas. Os maiores valores de erro padrão de estimativa encontrados por estes autores se deve em parte pelo, fato de terem usado a evapotranspiração medida em lisímetros de pesagem como método padrão.

Jensen (1974) afirma que apesar de ter sido proposto originalmente para estimativas diárias, o emprego deste método da radiação deve limitar-se a intervalos de cinco dias, exceto quando o saldo de radiação for medido diretamente, quando poderá ser adotado intervalo diário.

Com a adoção dos coeficientes estimados para cada mês nos diversos intervalos corrige-se a tendência de subestimativa de ETo pelo método de Makkink e obtêm-se estimativas mais precisas, com menor erro padrão de estimativa como observado nas Tabelas 1 a 4.

Tabela 1. Coeficientes da equação de Makkink para estimativa da evapotranspiração de referencia de Urussanga, SC em intervalos mensais.

Período	ETo = a W Rs + b		Coeficiente de determinação - R <sup>2</sup>	Erro padrão de estimativa (mm)
	a	b		
anual	0,811	-0,610	0,984	0,129
Janeiro	0,677	0,157	0,962	0,057
Fevereiro	0,740	-0,236	0,959	0,086
Março	0,651	0,115	0,903	0,082
Abril	0,535	0,388	0,919	0,059
Mai	0,529	0,142	0,777	0,087
Junho	0,487	0,156	0,685	0,071
Julho	0,460	0,256	0,708	0,080
Agosto	0,492	0,401	0,764	0,088
Setembro	0,624	0,133	0,674	0,124
Outubro	0,578	0,498	0,810	0,146
Novembro	0,690	0,898	0,927	0,118
Dezembro	0,700	0,113	0,822	0,114

Tabela 2. Coeficientes da equação de Makkink para estimativa da evapotranspiração de referencia de Urussanga, SC em intervalos decendiais.

Período	ETo = a W Rs + b		Coeficiente de determinação - R <sup>2</sup>	Erro padrão de estimativa (mm)
	a	b		
anual	0,789	-0,511	0,975	0,172
Janeiro	0,691	0,084	0,978	0,086
Fevereiro	0,744	-0,250	0,955	0,131
Março	0,677	-0,007	0,946	0,114
Abril	0,609	0,114	0,931	0,106
Mai	0,583	-0,005	0,833	0,120
Junho	0,443	0,274	0,734	0,095
Julho	0,503	0,162	0,768	0,117
Agosto	0,618	0,021	0,829	0,145
Setembro	0,618	0,169	0,861	0,154
Outubro	0,667	0,088	0,899	0,191
Novembro	0,708	0,003	0,946	0,156
Dezembro	0,701	0,106	0,919	0,140

Tabela 3. Coeficientes da equação de Makkink para estimativa da evapotranspiração de referencia de Urussanga, SC em intervalos quinquidiais.

Período	ETo = a W Rs + b		Coeficiente de determinação - R <sup>2</sup>	Erro padrão de estimativa (mm)
	a	b		

Período	a	b	determinação - R <sup>2</sup>	estimativa (mm)
anual	0,768	-0,391	0,964	0,221
Janeiro	0,678	0,165	0,979	0,114
Fevereiro	0,710	-0,063	0,956	0,162
Março	0,670	0,033	0,956	0,141
Abril	0,596	0,165	0,929	0,128
Mai	0,550	0,099	0,847	0,147
Junho	0,454	0,259	0,776	0,127
Julho	0,514	0,151	0,748	0,177
Agosto	0,620	0,033	0,828	0,201
Setembro	0,634	0,126	0,877	0,200
Outubro	0,671	0,080	0,904	0,241
Novembro	0,697	0,077	0,949	0,200
Dezembro	0,688	0,185	0,941	0,177

Tabela 4. Coeficientes da equação de Makkink para estimativa da evapotranspiração de referencia de Urussanga (SC) em intervalos diários.

Período	ET <sub>o</sub> = a W R <sub>s</sub> + b		Coeficiente de determinação - R <sup>2</sup>	Erro padrão de estimativa (mm)
Período	a	b	R <sup>2</sup>	(mm)
anual	0,707	-0,124	0,931	0,609
Janeiro	0,662	0,272	0,972	0,209
Fevereiro	0,672	0,166	0,959	0,248
Março	0,626	0,212	0,955	0,217
Abril	0,568	0,297	0,893	0,252
Mai	0,498	0,275	0,794	0,248
Junho	0,440	0,327	0,564	0,329
Julho	0,488	0,253	0,649	0,328
Agosto	0,599	0,154	0,755	0,392
Setembro	0,633	0,182	0,858	0,371
Outubro	0,647	0,239	0,905	0,384
Novembro	0,680	0,201	0,937	0,352
Dezembro	0,678	0,271	0,940	0,320

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ALLEN, R. G. Penman for all seasons. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, v.112, n.4, p.348-368, 1986.
- ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. Agron. j., Madison, v. 81, n4. p.650-662. 1989.

- ALLEN, R. G. PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Rome, 1998. FAO Irrigation and drainage paper 56.
- BACK, A. J.; ROSSO, J. C. Avaliação do desempenho de métodos empíricos baseados na radiação solar para a estimativa da evapotranspiração de referência. Criciúma, Revista Tecnologia e Ambiente. 2006 (no prelo)
- 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.
- CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H. Coeficientes das equações de Makink e Priestley-Taylor para a estimativa da evapotranspiração máxima da alfafa.Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, V.2:p.33-36, 1994
- DOOREMBOS, J.; PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome, FAO, 1977. 179p. (FAO Irrig. and Drainage Paper 24)
- DOOREMBOS, J.; KASSAN, A. H. Efeitos da água no rendimento dos cultivos. Estudos FAO, Irrigação e Drenagem, 33. Tradução de GHEYI, H. R. e outros. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. FAO.306p.1994.
- FREVERT. D.K.; HILL, R. W.; BRAATEN, B. C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. J. Irrig. Drain. Eng. Am. Soc. Civ. Eng.1983. 109(2): 265-270.
- JENSEN, M. E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. New York, ASCE, 1974. 215p.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water bare soil and grass. Proc. R. Soc. London, A193:120-146. 1948.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PEREIRA, F. A. C. Desempenho do modelo de Penman-Monteith e de dois evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) em relação a um lisímetro de pesagem. Piracicaba, 1998. 87p. Tese (doutorado)- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica.Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria,v.4,n.1. p.1-12. 1996
- SMITH, M. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Rome, FAO. 45p. 1991.