

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL BASEADA NA EVAPORAÇÃO NO TANQUE «CLASSE A» E NA UMIDADE DO SOLO^{1/}

Pedro Castro Neto^{2/}
Gilberto C. Sedyama^{3/}
Paulo Afonso Ferreira^{3/}
Manoel Vieira^{4/}

1. INTRODUÇÃO

Numa superfície natural, totalmente coberta por vegetação em fase de crescimento ativo, com altura uniforme e teor de umidade do solo próximo da capacidade de campo, a quantidade de água perdida para a atmosfera por unidade de tempo é conhecida como Evapotranspiração Potencial (EP); na falta de uma ou mais dessas condições é chamada de Evapotranspiração Real (ER).

Há boa correlação entre a Evapotranspiração Potencial diária e a Evaporação do Tanque «Classe A» (EV), o que comprova ser boa prática a estimativa da Evapotranspiração Potencial em função da Evaporação do «Classe A» (10).

Um recurso prático para estimar a Evapotranspiração Real é, primeiro, estimar a Evapotranspiração Potencial, com base em dados meteorológicos ou tanques de evaporação, e, depois, considerar os fatores que limitam a ocorrência da evapotranspiração no seu valor potencial (10).

Quando a umidade do solo está próxima da capacidade de campo, a evapotranspiração é mantida na razão potencial e determinada pelas condições climáti-

^{1/} Parte da tese apresentada, pelo primeiro autor, à Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção do grau de «Magister Scientiae».

Recebido para publicação em 21-02-1980.

^{2/} Escola Superior de Agricultura de Lavras, 37200 Lavras — MG.

^{3/} Departamento de Engenharia Agrícola — U.F.V., 36570 Viçosa — MG.

^{4/} Departamento de Matemática — U.F.V., 36570 Viçosa — MG.

cas predominantes. Na medida em que o solo perder umidade, a Evapotranspiração Real apresentará valores abaixo do valor da Evapotranspiração Potencial, a partir de determinado valor de umidade do solo (1, 2, 4, 6, 7, 9, 10, 11).

Se os fatores relacionados com a planta são constantes, o decréscimo da relação ER/EP com o decréscimo da umidade do solo pode ser um resultado do acréscimo da tensão com que a água está retida no solo ou do baixo valor da condutividade hidráulica no solo e nos tecidos das raízes, comparados com a maior demanda evaporativa da atmosfera (6).

Há muitas controvérsias quanto ao efeito da umidade do solo no decréscimo da relação ER/EP. VEIHMEYER e HENDRICKSON (12) afirmam que a evapotranspiração ocorre na razão potencial quando a umidade do solo está acima do ponto de murcha, caindo abruptamente a partir desse valor.

Thonrthwaite e Mather, citados por CHANG (3) e BAIER (1), com base em condições de pressão de vapor e dos perfis de temperatura, verificaram um decréscimo linear da relação ER/EP com o decréscimo da umidade do solo.

BAIER (1) concluiu que a relação ER/EP é constante e igual à unidade desde a capacidade de campo até 70% de água disponível, decrescendo linearmente de 70% de água disponível até o ponto de murcha.

EAGLEMAN (5), utilizando dados obtidos em várias condições climáticas e com diferentes coberturas vegetais do solo, confirma que os resultados de todos os experimentos mostraram que o valor da relação ER/EP aproxima-se da unidade quando a umidade do solo é alta, com um decréscimo acentuado à medida que decresce a umidade do solo. Esse autor apresenta os resultados de todos os experimentos na forma de equações cúbicas da relação ER/EP, em função da umidade do solo.

HOLMES e ROBERTSON (7) mostram que a Evapotranspiração Real é igual à Evapotranspiração Potencial durante algum tempo, decrescendo rapidamente a partir de determinado valor de umidade do solo, segundo uma forma exponencial.

Com dados obtidos em lisímetros de pesagem, PIERCE (9) concluiu que a Evapotranspiração Real se mantém acima de 90% da Evapotranspiração Potencial, enquanto a umidade, nos primeiros 75 a 90 cm de solo, estiver acima de aproximadamente um terço de água disponível. Depois, a Evapotranspiração Real cai mais rapidamente, até um valor abaixo de 50% da Evapotranspiração Potencial, para umidade do solo no ponto de murcha.

O conhecimento da relação entre a umidade do solo e a Evapotranspiração Real é importante para o planejamento da irrigação, visto que a escolha correta do momento de se fazer a irrigação, bem como da quantidade d'água a ser aplicada, tem efeito na produção qualitativa e quantitativa do vegetal. O intervalo entre irrigações pode ser aumentado se a Evapotranspiração Real for menor que a Evapotranspiração Potencial, a níveis mais baixos de umidade do solo.

Este trabalho teve os seguintes objetivos:

- a) Determinar os valores da razão entre a Evapotranspiração Real, ER, e a evaporação do tanque «Classe A», EV, em função da umidade do solo, expressa pelos «coeficientes de umidade do solo» propostos por BERNARDO (2), JENSEN *et alii* (8) e EAGLEMAN (5).
- b) Estabelecer equações para a estimativa da Evapotranspiração Real de acordo com a evaporação do Tanque «Classe A» e da umidade do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no «campus» da Universidade Federal de Viçosa, numa área plana, inteiramente coberta com grama Batatais (*Paspalum notatum*

Flugge).

Foram realizadas coletas diárias de amostras de solo em três segmentos de perfil (0 a 15, 15 a 30 e 30 a 45 cm), em três repetições, com o auxílio do amostrador tipo «King Tube», no período de janeiro a maio de 1979. As amostragens foram feitas em torno de oito horas da manhã, porque, nesse horário, tem-se melhor redistribuição da umidade ocorrida durante à noite no perfil de solo.

A determinação da umidade nas amostras de solo foi feita pelo «método padrão de estufa», sendo a umidade expressa em mm de lâmina d'água por 15 cm de coluna de solo.

Foram considerados três perfis de solo: 0 a 15, 0 a 30 e 0 a 45 cm; a umidade de 0 a 30 cm, para cada dia, foi considerada como sendo a soma do conteúdo de umidade no perfil de 0 a 15 cm mais o de 15 a 30 cm; para o perfil de 0 a 45 cm, foi considerada como a soma do conteúdo de umidade no perfil de 0 a 30 cm com o conteúdo observado na amostra de 30 a 45 cm.

Para cada perfil, a Evapotranspiração Real de um dia 1 (ER_i) foi dada pela equação

$$ER_i = UA_{i-1} - UA_i + P_i \quad (1)$$

em que UA_i e UA_{i-1} representam as umidades do perfil nos dias i e $i-1$, respectivamente, e P_i representa a precipitação efetiva ocorrida no dia i .

Da estação climatológica principal do INMET-MA/UFV, situada em Viçosa, latitude de $20^{\circ}45'S$, longitude de $42^{\circ}51'W$ e altitude de 651 metros, foram obtidos os dados diários de precipitação e evaporação do Tanque «Classe A» (EV). Foi considerado que a Evapotranspiração Real era sempre inferior ou igual à Evaporação do Tanque «Classe A».

A disponibilidade de água no solo foi expressa por meio de três diferentes «coeficientes de umidade do solo», representados pelas seguintes equações:

$$KB = \frac{\ln [(UA - PM) + 1,0]}{\ln [(CC - PM) + 1,0]} \quad (2)$$

$$KJ = \frac{\ln (UA^* + 1,0)}{\ln 101} \quad (3)$$

$$KE = \frac{UA - PM}{CC - PM} \quad (4)$$

em que

KB, KJ e KE são «coeficientes de umidade do solo», propostos, respectivamente, por BERNARDO (2), JENSEN *et alii* (8) e EAGLEMAN (5) (adimensional)

CC = teor de umidade do solo na capacidade de campo (mm)

PM = teor de umidade do solo no ponto de murcha (mm)

UA = umidade atual do solo (mm)

UA* = umidade atual do solo (% de água disponível)

Os dados de umidade do solo foram utilizados em termos de média diária, ou seja, média de duas amostragens consecutivas, com o intuito de diminuir possíveis problemas de heterogeneidade dos dados.

Foram testadas, por meio de análise de regressão, as seguintes equações:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X \quad (5)$$

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 \quad (6)$$

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 + a_3 \cdot X^3 \quad (7)$$

$$Y = a_0 + a_1 \cdot \exp(X) \quad (8)$$

$$\ln Y = a_0 + a_1 \cdot X \quad (9)$$

$$\ln Y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 \quad (10)$$

$$\ln Y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 + a_3 \cdot X^3 \quad (11)$$

As equações foram testadas para todas as combinações entre ER/EV, como variável dependente (Y), e KB, KJ e KE, como variáveis independentes (X), para cada um dos perfis estudados. A seleção da equação que melhor se ajustou a cada caso foi feita com base na análise de variância da regressão e no valor do coeficiente de determinação. Observou-se também a significância dos coeficientes da equação de regressão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise física do solo, efetuada pelo Departamento de Ciências do Solo da Escola Superior de Agricultura de Lavras, apresentou os resultados que se vêem no Quadro 1.

QUADRO 1 - Resultado da análise física do solo para os três segmentos de perfil estudados

Profundidade (cm)	0-15	15-30	30-45
Umidade (%) a 1/3 de atm	29,29	25,63	30,76
Umidade (%) a 15 atm	19,39	18,46	19,16
Densidade aparente (g/cm ³)	1,18	1,23	1,23
Areias (%)	41,80	47,80	44,80
Limo (%)	6,20	8,20	8,20
Argila (%)	52,00	44,00	47,00
Classe textural	argila	argila arenosa	argila

O efeito da umidade do solo na relação ER/EV, determinada com a utilização do «coeficiente de umidade» KB, é apresentado nas Figuras 1, 2 e 3, para os perfis de 0 a 15, 0 a 30 e 0 a 45 cm de profundidade, respectivamente, com valores de 0,84, 0,85 e 0,75 para os coeficientes de determinação.

Nas Figuras 4, 5 e 6 são apresentados os valores da relação ER/EV, respectivamente, para os perfis de 0 a 15, 0 a 30 e 0 a 45 cm, em função da disponibilidade de

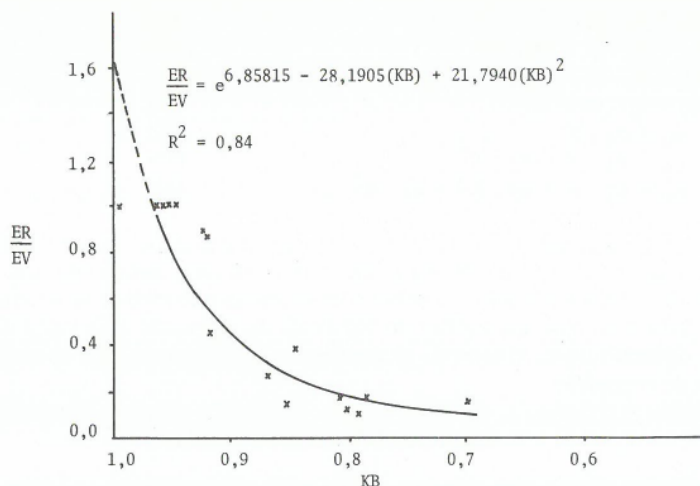


FIGURA 1 - Valores da razão entre a Evapotranspiração Real (ER) e a Evaporação do Tanque "Classe A" (EV), em função do "coeficiente de umidade do solo" proposto por BERNARDO (KB), para o perfil de 0 a 15 cm.

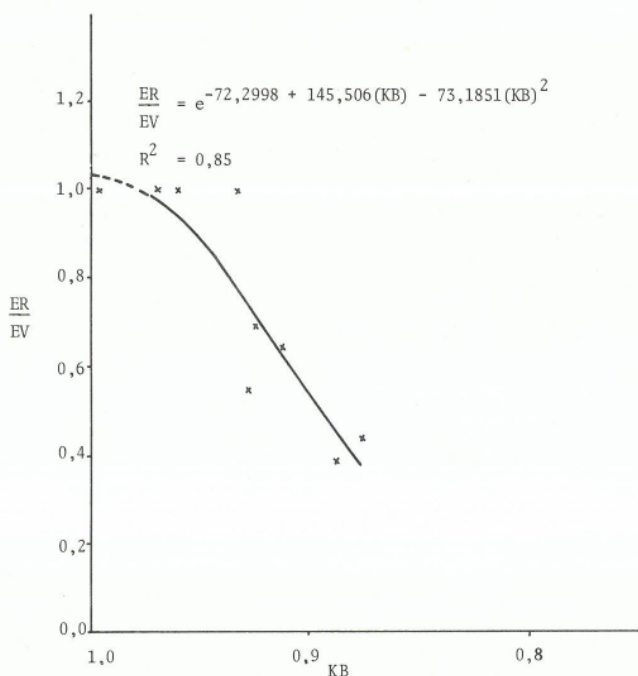


FIGURA 2 - Valores da razão entre a Evapotranspiração Real (ER) e a Evaporação do Tanque "Classe A" (EV), em função do "coeficiente de umidade do solo" proposto por BERNARDO (KB), para o perfil de 0 a 30 cm.

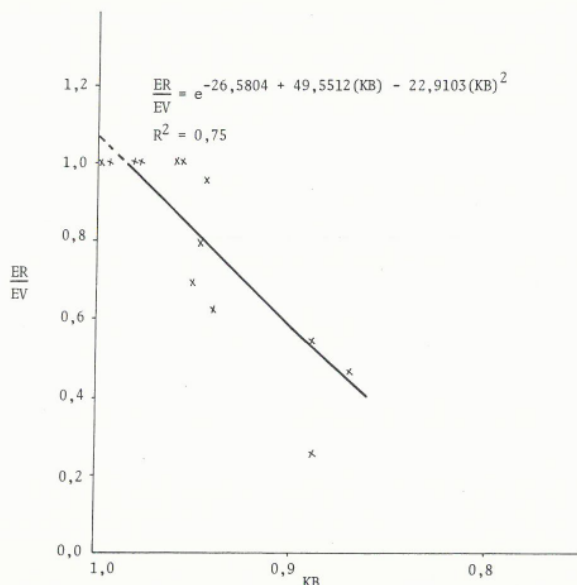


FIGURA 3 - Valores da razão entre a Evapotranspiração Real (ER) e a Evaporação do Tanque "Classe A" (EV), em função do "coeficiente de umidade do solo" proposto por BERNARDO (KB), para o perfil de 0 a 45 cm.

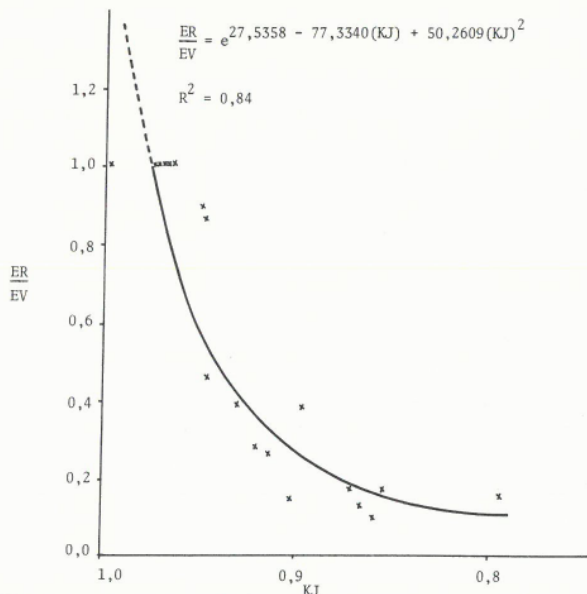


FIGURA 4 - Valores da razão entre a Evapotranspiração Real (ER) e a Evaporação do Tanque "Classe A" (EV), em função do "coeficiente de umidade do solo" proposto por JENSEN *et alii* (KJ), para o perfil de 0 a 15 cm.

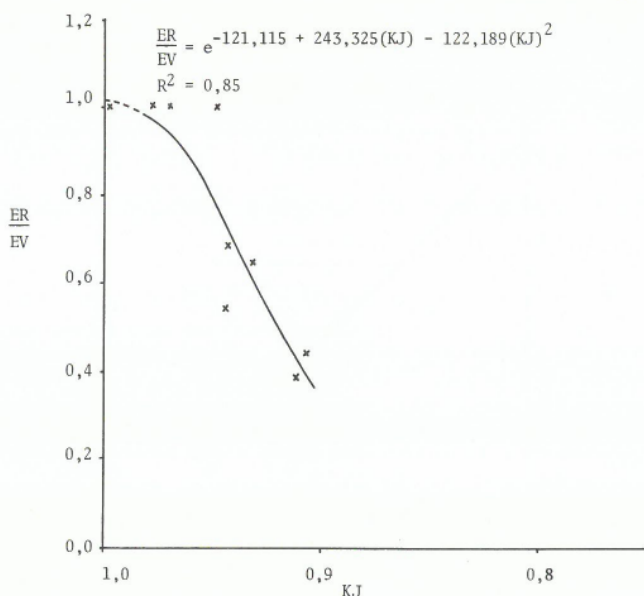


FIGURA 5 - Valores da razão entre a Evapotranspiração Real (ER) e a Evaporação do Tanque "Classe A" (EV), em função do "coeficiente de umidade do solo" proposto por JENSEN *et alii* (KJ), para o perfil de 0 a 30 cm.

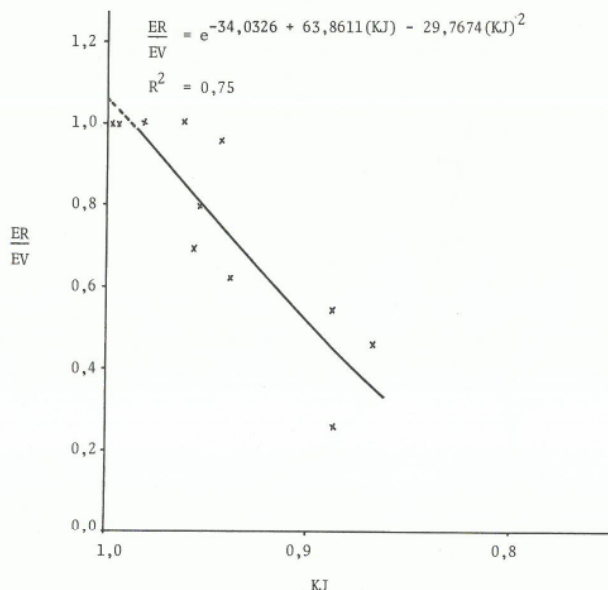


FIGURA 6 - Valores da razão entre a Evapotranspiração Real (ER) e a Evaporação do Tanque "Classe A" (EV), em função do "coeficiente de umidade do solo" proposto por JENSEN *et alii* (KJ), para o perfil de 0 a 45 cm.

água no solo, representada pelo «coeficiente de umidade do solo» proposto por JENSEN *et alii* (KJ).

Os coeficientes de determinação encontrados para os perfis de 0 a 15, 0 a 30 e 0 a 45 cm foram, respectivamente, 0,84, 0,85 e 0,75, e apenas o primeiro difere em um centésimo dos encontrados quando a disponibilidade de água no solo foi expressa pelo «coeficiente de umidade» de BERNARDO (KB), mudando apenas os valores dos coeficientes da equação de regressão.

Para os três perfis, a equação de regressão que melhor se ajustou aos valores experimentais foi a do tipo $\ln y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2$, quando foram utilizados os «coeficientes de umidade» KB e KJ.

O efeito da umidade do solo na relação ER/EV, determinada com a utilização do «coeficiente de umidade do solo» proposto por EAGLEMAN (KE), encontra-se nas Figuras 7, 8 e 9, para os perfis de 0 a 15, 0 a 30 e 0 a 45 cm de profundidade, respectivamente, com valores de 0,92, 0,93 e 0,76 para os coeficientes de determinação.

Nota-se que, para cada camada, quando se utilizou o «coeficiente de umidade do solo» KE, obtiveram-se valores mais elevados para o coeficiente de determinação.

Quando se utilizou o coeficiente KE, a equação que melhor se ajustou aos valores observados foi a cúbica, concordando com os resultados obtidos por DENMEAD e SHAW (4), EAGLEMAN (5) e VAN BAVEL (11). Além disso, o KE é o «coeficiente de umidade do solo» de maior facilidade de cálculo.

Observa-se, de modo geral, que a Evapotranspiração Real apresenta valores menores que a Evaporação do Tanque «Classe A» a níveis relativamente altos de umidade do solo, o que concorda com a teoria de Holmes, citado por CHANG (3), a qual indica um decréscimo mais rápido da relação entre a Evapotranspiração Real e a Potencial, em função da umidade do solo, para solos argilosos.

4. RESUMO E CONCLUSÕES

Foram retidas, diariamente, do «campus» da UFV, amostras de solo no período de janeiro a maio de 1979, em três profundidades e três repetições. As amostragens foram feitas aleatoriamente, em torno de 8 horas da manhã.

A umidade do solo foi determinada pelo método padrão de estufa, calculando-se o conteúdo médio de umidade, para cada dia, nos perfis de 0 a 15, 0 a 30 e 0 a 45 cm, sendo a umidade do solo expressa por meio de três diferentes «coeficientes de umidade do solo», propostos por BERNARDO (KB), JENSEN *et alii* (KJ) e EAGLEMAN (KE).

A Evapotranspiração Real foi determinada pelo balanço de água no solo.

Foram testados vários tipos de equações de regressão da relação entre a Evapotranspiração Real (ER) e a Evaporação do Tanque «Classe A» (EV), em função de cada «coeficiente de umidade do solo» e para cada perfil estudado, sendo apontada a melhor equação para cada caso, com base no coeficiente de determinação (R^2).

Nas condições deste trabalho, de acordo com os resultados encontrados, tiraram-se as seguintes conclusões:

A equação de regressão cúbica pode ser utilizada para descrever a relação ER/EV, em função do «coeficiente de umidade do solo» KE.

A equação de regressão do tipo $\ln Y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2$ pode ser utilizada para descrever a relação ER/EV, em função dos «coeficientes de umidade do solo» KB ou KJ.

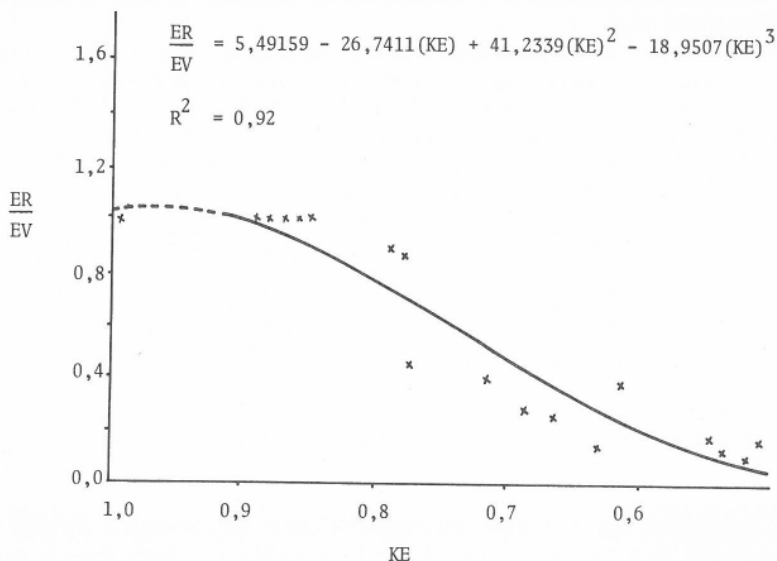


FIGURA 7 - Valores da razão entre a Evapotranspiração Real (ER) e a Evaporação do Tanque "Classe A" (EV), em função do "coeficiente de umidade do solo" proposto por EAGLEMAN (KE), para o perfil de 0 a 15 cm.

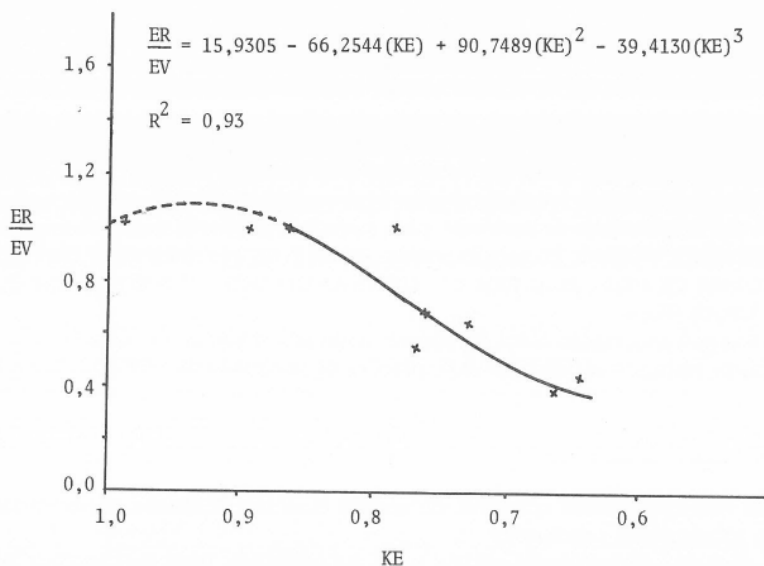
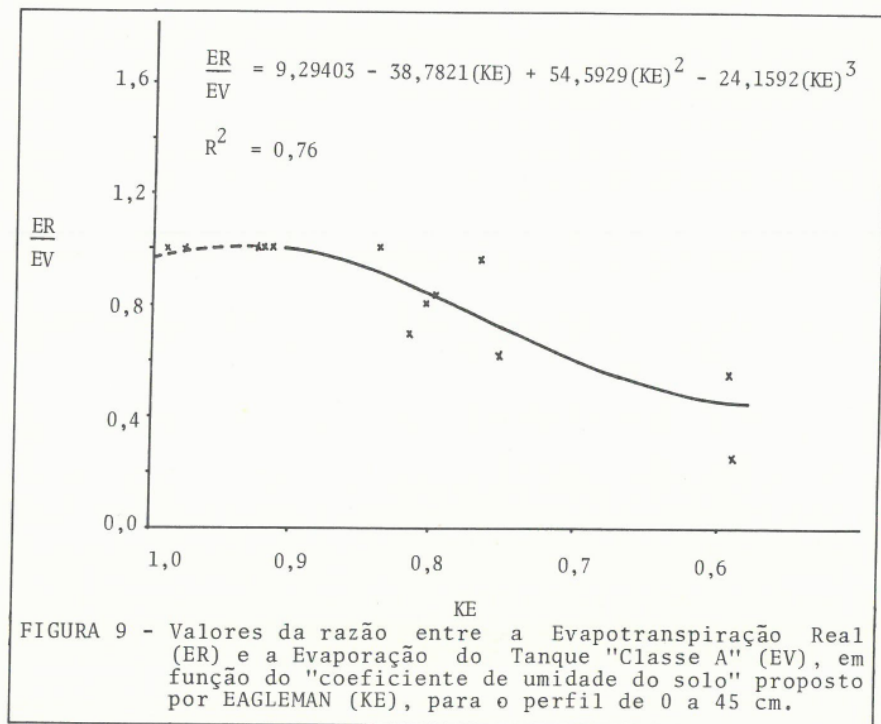


FIGURA 8 - Valores da razão entre a Evapotranspiração Real (ER) e a Evaporação do Tanque "Classe A" (EV), em função do "coeficiente de umidade do solo" proposto por EAGLEMAN (KE), para o perfil de 0 a 30 cm.



A utilização do «coeficiente de umidade do solo» KE mostrou melhores resultados, em comparação com os demais coeficientes (KB e KJ), para os três perfis estudados.

Conhecendo-se o valor da Evaporação do Tanque «Classe A» de um dia e a umidade média do dia anterior, pode-se estimar o valor da Evapotranspiração Real, utilizando perfis de solo de 0 a 15, 0 a 30 e 0 a 45 cm, respectivamente, pelas seguintes equações:

a) $ER = (5,49 - 26,74 \cdot KE + 41,23 \cdot KE^2 - 18,95 \cdot KE^3) EV$

b) $ER = (15,93 - 66,25 \cdot KE + 70,75 \cdot KE^2 - 39,41 \cdot KE^3) EV$

c) $ER = (9,29 - 38,78 \cdot KE + 54,59 \cdot KE^2 - 24,16 \cdot KE^3) EV$

5. SUMMARY

Soil moisture measurements, determined by oven-drying at 105°C and taken over a four month period (January thru May on 1979), were used to test the effects of various relationships between the Soil Moisture Coefficients (KB, KJ and KE, proposed, respectively, by BERNARDO, JENSEN *et alii* and EAGLEMAN) and the ratio of actual evapotranspiration (ER) to Class A pan evaporation (EV) on soil moisture estimate obtained by soil water balance approach.

The results suggest that the actual evapotranspiration can be estimated by using daily Class A pan evaporation data and the EAGLEMAN Soil Moisture Coefficient, KE, for the three soil layers: 0-15, 0-30 and 0-45 cm of soil profile.

6. LITERATURA CITADA

1. BAIER, W. Concepts of soil moisture availability and their effect on soil moisture estimates from a meteorological budget. *Agric. Meteorol.*, 6:165-178. 1969.
2. BERNARDO, S. *A computerized model to predict supplemental irrigation in tropical and subtropical climate*. Utah State University, 1975. 140 p. (Tese Ph.D.).
3. CHANG, Jen-Hu. *Climate and agriculture: and ecological survey*. Chicago, Aldine Publishing Company, 2.^a ed., 1971. 296 p.
4. DENMEAD, O.T. & SHAW, R.W. Availability of soil water to plant as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agron Jour.*, 45:385-390. 1962.
5. EAGLEMAN, J.R. An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agric. Meteorol.*, 8:385-394. 1971.
6. EAGLEMAN, J.R. & DECKER, W.L. The role of soil moisture in evapotranspiration. *Agron. Jour.*, 57:626-629. 1965.
7. HOLMES, R.M. & ROBERTSON, G.W. Application of the relationship between actual and potential evapotranspiration in dry land agriculture. *Transactions of the ASAE*, 6:65-67. 1963.
8. JENSEN, M.E., WRIGHT, J.L. & PRATT, B.J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. *Transactions of the ASAE*, 69:954-959. 1971.
9. PIERCE, L.T. Estimating seasonal and short-term fluctuations in evapotranspiration from meadow crops. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 39:73-78. 1958.
10. SAXTON, K.E., JOHNSON, H.P. & SHAW, R.H. Watershed evapotranspiration estimated by the combination method. *Transactions of the ASAE*, 17:668-672. 1974.
11. VAN BAVEL, C.H.M. Changes in canopy resistance to water loss from alfalfa induced by soil water depletion. *Agric. Meteorol.*, 4:165-176. 1967.
12. VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, A.H. Does transpiration decrease as the soil moisture decrease? *Trans. An. Geophys. Union*, 36:425-448. 1955.