

Este trabalho tem como objetivo determinar a perda d'água por percolação e por «runoff» em irrigação por sulco. A percolação é determinada por meio de um modelo que considera a velocidade de infiltração d'água no solo, a infiltração acumulada, a velocidade de avanço d'água no sulco e a capacidade de retenção d'água no solo. A perda d'água por «runoff» é determinada por meio de um modelo que considera a velocidade de infiltração d'água no solo, a infiltração acumulada, a velocidade de avanço d'água no sulco e a capacidade de retenção d'água no solo. O modelo de percolação é aplicado a um solo com propriedades físicas e químicas diferentes, e o modelo de «runoff» é aplicado a um solo com propriedades físicas e químicas diferentes. O resultado é que a perda d'água por percolação é menor que a perda d'água por «runoff» em irrigação por sulco.

DETERMINAÇÃO DA PERDA D'ÁGUA POR PERCOLAÇÃO E POR «RUNOFF» EM IRRIGAÇÃO POR SULCO*

Salassier Bernardo**

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos projetos de irrigação por sulco não é dimensionada para as condições locais de solo e topografia. Importantes parâmetros, tais como velocidade de infiltração d'água no solo, infiltração acumulada, velocidade de avanço d'água no sulco, capacidade de retenção d'água no solo, etc., geralmente não são determinados para um correto dimensionamento do projeto. Quando são determinados, são-no somente depois da instalação do projeto no campo. Pouco tem sido feito para saber a vazão a ser aplicada no sulco, para as condições locais, a fim de evitar a erosão, bem como para determinar o comprimento adequado do sulco, para que se consiga uma boa distribuição d'água na zona radicular da cultura a ser irrigada. Sendo assim, dificilmente se encontram projetos de irrigação por sulco com boa eficiência de irrigação. ISRAELSEN *et alii* (5), determinando a eficiência de irrigação em 130 fazendas irrigadas no Estado de Utah, encontraram um valor médio abaixo de 44%. Encontram-se resultados semelhantes em outras áreas, inclusive no Brasil.

O excesso de irrigação não causa apenas perda d'água. Causa também a lixiviação dos nutrientes hidrossolúveis para as camadas abaixo da zona radicular das plantas, bem como problemas de afloração do lençol freático nas áreas abaixo da que está sendo irrigada.

Vários autores (1, 2, 3, 4, 5, 6) analisaram os efeitos da velocidade de infiltração d'água no solo e do avanço d'água no sulco sobre a eficiência da irrigação.

O presente trabalho tem por objetivo determinar a relação entre comprimento do sulco e velocidade de infiltração e as perdas d'água por percolação e por «runoff».

2. CÁLCULO DA PERCOLAÇÃO

2.1. *Método de Bishop*

Quando se tem uma baixa eficiência de distribuição em irrigação por sulco, nota-se o seu efeito pela queda de produção no final e/ou no início do sulco. Isto

* Trabalho apresentado no VII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Petrópolis, R.S., de 26 a 29 de julho de 1977.

Recebido para publicação em 19-09-1977.

** Professor Titular da Universidade Federal de Viçosa.

decorre da deficiência d'água no final do sulco e do excesso no início. Em geral, a baixa eficiência de distribuição está associada com o excesso de percolação no início do sulco.

A primeira análise matemática de perda por percolação foi descrita por CRIDDLE (3), quando surgiu a recomendação de que a frente de avanço d'água deve atingir a extremidade final do sulco em 1/4 do tempo necessário para a aplicação da lámina de irrigação desejada, mantendo-se a vazão inicial ou reduzida no sulco até que seja infiltrada na sua extremidade final a lámina que se deseja aplicar por irrigação. Sendo assim, a água ficará em contato com a extremidade inicial do sulco durante 5 intervalos de tempo e com a extremidade final durante 4 intervalos de tempo. Criddle usou o seguinte tipo de equação para descrever a infiltracão acumulada d'água no solo:

$$D = K T^n$$

Equação 1

onde:

D = infiltração acumulada, em cm

k e n = constantes, funções do solo

T = tempo de oportunidade, em minuto

Há várias equações que descrevem o avanço d'água no sulco, sendo muito usada a equação do seguinte tipo:

$$L = C T^m$$

Equação 2

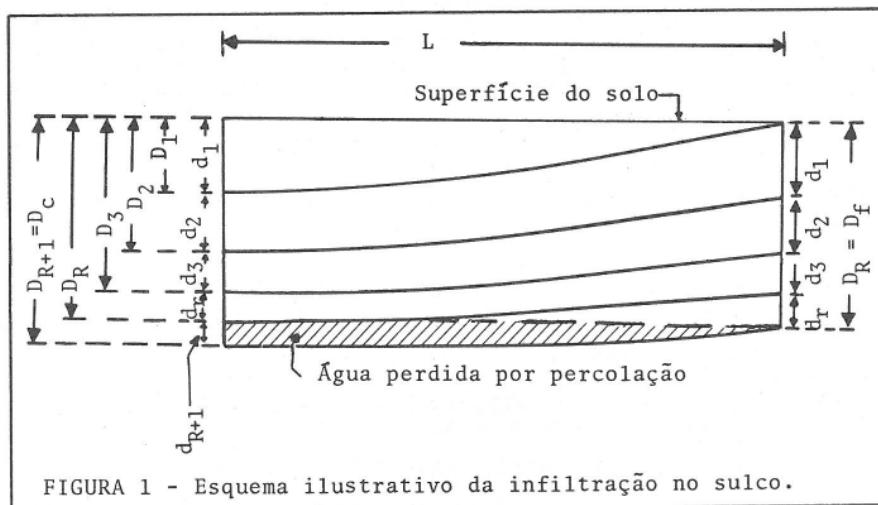
onde:

L = comprimento do sulco, em m

c, m = constantes, funções do solo, da vazão e da declividade

T = tempo de avanço, em minuto

BISHOP (2), continuando o trabalho, para determinar as perdas por percolação, usou o seguinte gráfico:



Para construção da Figura 1 foi assumido:

Ta = tempo para que a água chegue à extremidade final do sulco
 T2, T3, T4 = intervalos de tempo múltiplos de Ta; T2 = 2 Ta; T3 = 3 Ta; T4 = 4 Ta

Tr = tempo requerido para aplicação da lâmina desejada na irrigação sem que haja percolação; Tr = R Ta

$$R = \frac{Tr}{Ta}$$

Equação 3

D1 = lâmina infiltrada no tempo Ta; D1 = d1

D2 = lâmina infiltrada no tempo 2 Ta

d2 = lâmina infiltrada no 2.º intervalo de tempo; d2 = D2 = D1

DR = lâmina infiltrada no tempo R Ta

DR + 1 = lâmina infiltrada no tempo (R + 1)Ta

Df = lâmina infiltrada na extremidade final do sulco, a qual deve ser igual à lâmina que se deseja aplicar por irrigação; Df = DR

Dc = lâmina infiltrada na extremidade inicial do sulco; Dc = DR + 1

L = Comprimento do sulco

Usando a equação 1 e os parâmetros acima, tem-se:

$$D_1 = d_1 = K Ta^n$$

Equação 4

$$D_2 = K T_2^n = K (2Ta)^n = K Ta^n 2^n$$

Equação 5

$$d_2 = D_2 - D_1 = d_1 (2^n - 1)$$

Equação 6

$$D_3 = K T_3^n = d_1 3^n$$

Equação 7

$$d_3 = D_3 - D_2 = d_1 (3^n - 2^n)$$

Equação 8

$$D_R = K Tr^n = d_1 R^n$$

Equação 9

$$D_{R+1} = K (Tr+1)^n = d_1 (R+1)^n$$

Equação 10

Baseado no princípio de que, à medida que o tempo aumenta, a velocidade de infiltração d'água no solo aproxima-se de um valor constante (velocidade de infiltração básica), BISHOP (2) justificou a distribuição triangular para a água percolada abaixo da zona radicular, como mostra a Figura 1. Sendo assim, o volume d'água perdido por percolação será:

$$V_p = (D_c - D_f) \frac{L}{2} = [(R+1)^n - R^n] d_1 \frac{L}{2} \quad \text{Equação 11}$$

O volume total infiltrado ao longo do sulco será:

$$V_t = (D_c + D_f) \frac{L}{2} = [(R+1)^n + R^n] d_1 \frac{L}{2} \quad \text{Equação 12}$$

A percentagem d'água perdida por percolação, em relação ao total infiltrado ao longo do sulco, será:

$$P = \frac{V_p}{V_t} \times 100 = \frac{(R+1)^n - R^n}{(R+1)^n + R^n} \times (100) \quad \text{Equação 13}$$

BISHOP (2) ainda assumiu que a percentagem varia linearmente de acordo com n, no intervalo entre n = 0 e n = 1. Analisando a equação 12, tem-se:

$$\text{para } n = 0 \quad P = 0$$

$$\text{para } n = 1 \quad P = \frac{1}{2R+1} \times (100)$$

Deste modo, a equação de BISHOP mais simplificada para o cálculo da percentagem percolada será:

$$P = \frac{n}{2R+1} \times (100) \quad \text{Equação 14}$$

Nesta análise, BISHOP (2) fez duas importantes suposições:

- Para determinar a equação 10 foi assumida uma distribuição triangular da água percolada, distribuição esta que, na realidade, é curvilinear.
- Para determinar a equação 13 foi assumida uma correlação linear entre a perda por percolação e o valor de n.

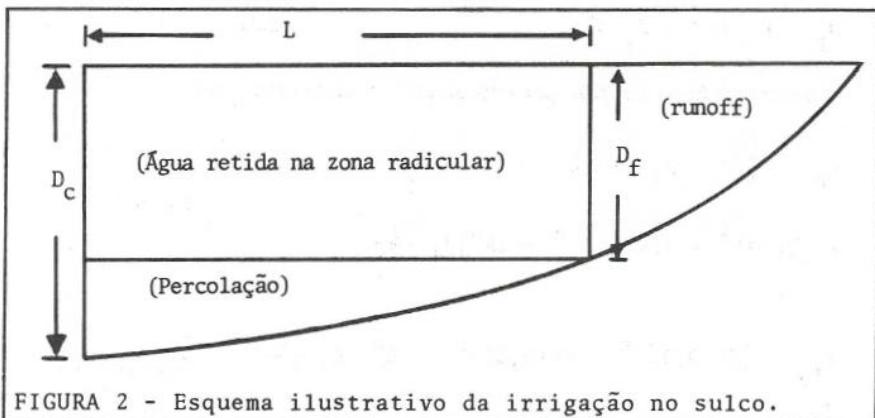
2.2. Desenvolvimento do Novo Método

Para determinar corretamente o volume percolado ter-se-ia que calcular a área correspondente à percolação por um método planimétrico ou por integração, métodos estes que têm menos condição de serem executados.

Por isso, apresenta-se um método mais aproximado que o de BISHOP, e com a mesma simplicidade de cálculo. Na Figura 2 tem-se um perfil da irrigação no sulco.

Consiste em se dividir o tempo de avanço T_a e o tempo requerido para aplicação da lâmina de irrigação, T_r , em quatro intervalos cada um, assumindo-se uma variação linear dentro de cada intervalo, o que será bem mais preciso que assumir uma variação linear dentro de todo o tempo de avanço ou do tempo requerido para aplicação da lâmina de irrigação.

Fazendo a divisão em intervalos iguais de tempo, encontrar-se-á um primeiro setor mais comprido que o segundo, este mais comprido que o terceiro, e assim sucessivamente. Isto aumenta ainda mais a precisão do novo método, pois a concavidade do perfil de infiltração aumenta à medida que se aproxima da extremidade inferior do sulco, onde se terão, pelo novo método, setores mais curtos.



2.2.1. Cálculo da Percentagem d'Água Percolada

Se o tempo de avanço for dividido em quatro intervalos iguais, o comprimento de cada setor poderá ser calculado com a equação 2:

$$L_1 = C \left[(0,25 \text{ Ta})^m \right] \quad \text{Equação 15}$$

$$L_2 = C \left[(0,50 \text{ Ta})^m - (0,25 \text{ Ta})^m \right] \quad \text{Equação 16}$$

$$L_3 = C \left[(0,75 \text{ Ta})^m - (0,50 \text{ Ta})^m \right] \quad \text{Equação 17}$$

$$L_4 = C \left[\text{Ta}^m - (0,75 \text{ Ta})^m \right] \quad \text{Equação 18}$$

As lâminas infiltradas nas extremidades desses setores serão:

$$D_{R+1} = K (Tr + 1)^n = d_1 (R+1)^n \quad \text{Equação 10}$$

$$z_1 = K (Tr + 0,75)^n = d_1 (R+0,75)^n \quad \text{Equação 19}$$

$$z_2 = K (Tr + 0,50)^n = d_1 (R+0,50)^n \quad \text{Equação 20}$$

$$z_3 = K (Tr + 0,25)^n = d_1 (R+0,25)^n \quad \text{Equação 21}$$

$$D_R = K \cdot T r^n = d_1 \cdot R^n$$

Equação 9

O volume d'água perdido por percolação em cada setor será:

$$V_{P_1} = [(D_c - D_f) + (Z_1 - D_f)] \times \frac{L_1}{2} = \\ = [(R+1)^n + (R+0,75)^n - 2R^n] d_1 \frac{L_1}{2}$$

Equação 22

$$V_{P_2} = [(R+0,73)^n + (R+0,50)^n - 2R^n] d_1 \frac{L_2}{2}$$

Equação 23

$$V_{P_3} = [(R+0,50)^n + (R+0,25)^n - 2R^n] d_1 \frac{L_3}{2}$$

Equação 24

$$V_{P_4} = [(R+0,25)^n - R^n] d_1 \frac{L_4}{2}$$

Equação 25

O volume total d'água percolada será:

$$V_p = V_{P_1} + V_{P_2} + V_{P_3} + V_{P_4}$$

Equação 26

O volume d'água retido na zona radicular será:

$$V_u = D_f \times L = d_1 \cdot R^n \cdot L$$

Equação 27

A percentagem d'água perdida por percolação, em relação ao volume retido na zona radicular, será:

$$P_p = \frac{V_p}{V_u} \cdot (100)$$

Equação 28

Substituindo-se as equações 22 a 27 em 28, assumindo-se que a percentagem percolada varia linearmente de acordo com n , no intervalo de zero a um, e simplificando-se, ter-se-á:

$$\text{para } n = 0 \quad P_p = 0$$

$$\text{para } n = 1 \quad P_p = \frac{(1,75L_1 + 1,25L_2 + 0,75L_3 + 0,25L_4)}{2RL} \cdot (100)$$

Assim sendo, a equação simplificada para cálculo da percentagem percolada será:

$$\frac{p_p}{p} = \frac{(1,75L_1 + 1,25L_2 + 0,75L_3 + 0,25L_4) n 100}{2RL}$$

Equação 29

2.2.2. Cálculo da Percentagem de «runoff»

Dividindo-se o tempo em que ocorreu «runoff», ou seja, o tempo requerido para aplicação da lámina de irrigação, Tr , em quatro intervalos de tempo iguais, como no caso anterior, poder-se-á calcular o comprimento de cada setor:

$$X_1 = C [(Ta + 0,25 Tr)^m - Ta^m]$$

Equação 30

$$X_2 = C (Ta + 0,50 Tr)^m - (L + X_1)$$

Equação 31

$$X_3 = C (Ta + 0,75 Tr)^m - (L + X_1 + X_2)$$

Equação 32

$$X_4 = C (Ta + Tr)^m - (L + X_1 + X_2 + X_3)$$

Equação 33

As láminas infiltradas nas extremidades desses setores serão:

$$D_R = K Tr^n = d_1 R^n$$

Equação 9

$$Y_1 = K (0,75 Tr)^n = d_1 R^n (0,75)^n$$

Equação 34

$$Y_2 = K (0,50 Tr)^n = d_1 R^n (0,50)^n$$

Equação 35

$$Y_3 = K (0,25 Tr)^n = d_1 R^n (0,25)^n$$

Equação 36

$$Y_4 = 0$$

O volume d'água correspondente a «runoff» em cada setor será:

$$V_{r1} = (Dr + Y_1) \times \frac{X_1}{2} = [1 + (0,75)^n] d_1 R^n \frac{X_1}{2} \quad \text{Equação 37}$$

$$V_{r2} = (Y_1 + Y_2) \frac{X_2}{2} = [(0,75)^n + (0,50)^n] d_1 R^n \frac{X_2}{2} \quad \text{Equação 38}$$

$$V_{r3} = (Y_2 + Y_3) \frac{X_3}{2} = [(0,50)^n + (0,25)^n] d_1 R^n \frac{X_3}{2} \quad \text{Equação 39}$$

$$V_{r4} = (Y_3 + Y_4) \frac{X_4}{2} = [(0,25)^n] d_1 R^n \frac{X_4}{2} \quad \text{Equação 40}$$

O volume total de «runoff» será:

$$V_r = V_{r1} + V_{r2} + V_{r3} + V_{r4}$$

Equação 41

A percentagem d'água perdida por «runoff», em relação ao volume retido na zona radicular, será:

$$P_r = \frac{V_r}{V_u} \cdot 100$$

Equação 42

Substituindo-se as equações 37 a 41 em 42, ter-se-á:

$$P_r = \frac{[1 + (0,75)^n] X_1 + [(0,75)^n + (0,50)^n] X_2 + [(0,50)^n + (0,25)^n] X_3 + (0,25)^n X_4}{2 L} \cdot 100$$

Equação 43

2.2.3. Exemplos de Cálculo da Percentagem Percolada e Percentagem de «runoff» pelo Novo Método

BERNARDO *et alii* (1), determinando a velocidade de infiltração e de avanço d'água no sulco, para diversas vazões, obtiveram, para vazão de 0,4 l/s e declividade de 1,5%, em sulco usado, as seguintes equações:

$$D = 4,2 T^{0,5} \text{ (mm)}$$

$$L = 10 T^{0,47} \text{ (m)}$$

a) Para aplicação de uma lâmina de 49 mm por irrigação num sulco de 100 m, ter-se-á:

— Tempo para que o fluxo chegue ao fim do sulco

$$T_a = 134 \text{ minutos}$$

— Tempo para infiltração de 49 mm

$$T_r = 134 \text{ minutos}$$

$$- R = \frac{T_r}{T_a} = 1$$

— Cálculo da percentagem percolada pelo novo método, usando-se as equações 15 a 18:

$$L_1 = 52 \text{ m}$$

$$L_2 = 20 \text{ m}$$

$$L_3 = 15 \text{ m}$$

$$L_4 = 13 \text{ m}$$

Com a equação 29

Percentagem percolada (P_p) = 33%

— Pela equação de BISHOP a percentagem d'água percolada, em relação ao volume retido na zona radicular, será:

$$P_p = 25\%$$

Cálculo da percentagem de «runoff»

— Com as equações 30 a 33:

$$X_1 = 11 \text{ m}$$

$$X_2 = 10 \text{ m}$$

$$X_3 = 9 \text{ m}$$

$$X_4 = 8 \text{ m}$$

— Com a equação 43:

Percentagem de «runoff» (P_r) = 26%

b) Para aplicação de uma lámina de 69 mm por irrigação num sulco de 100 m ter-se-á:

$$T_a = 134 \text{ minutos}$$

$$T_r = 268 \text{ minutos}$$

$$R = 2$$

— Cálculo da percentagem percolada pelo novo método:

$$L_1 = 52 \text{ m}$$

$$L_2 = 20 \text{ m}$$

$$L_3 = 15 \text{ m}$$

$$L_4 = 13 \text{ m}$$

$$\text{Percentagem percolada } (P_p) = 16\%$$

— Cálculo da percentagem percolada pelo método de BISHOP:

$$P_p = 12,5 \%$$

— Cálculo da percentagem de «runoff»:

$$X_1 = 21 \text{ m}$$

$$X_2 = 18 \text{ m}$$

$$X_3 = 15 \text{ m}$$

$$X_4 = 14 \text{ m}$$

$$P_r = 46\%$$

3. RESUMO

São apresentadas as equações 29 e 43 para cálculo da percentagem de percolação e de «runoff», respectivamente. As equações expressam as percentagens de percolação e de «runoff» em função dos comprimentos em que foram divididos os setores, do expoente da equação de infiltração acumulada, do comprimento do sulco e da razão entre o tempo para aplicação da lámina de irrigação e o tempo para que o fluxo chegue ao final do sulco (fator R). Essas equações, como foi comprovado em dois exemplos, são mais precisas que a equação de BISHOP.

Quanto maior for o número de intervalos em que for dividido o tempo de avanço (Ta) mais preciso será o cálculo da percentagem de percolação. Acredita-se, porém, que com quatro intervalos já se tem uma precisão bastante satisfatória para as condições de dimensionamento de projetos de irrigação.

4. SUMMARY

Mathematical equations for the computation of deep percolation and runoff are presented. The equations express the percentages of deep percolation and runoff as a function of the length of each sector, the exponent of the accumulated infiltration equation, the length of the furrow and the factor R (ratio of the time of application and time necessary for the flow to reach the end of the furrow). These equations yield good results as shown by comparison with the Bishop equation for two field data.

The greater the number of intervals in which the time of advance is divided, the more precise will be the calculation of percentage of percolation.

5. LITERATURA CITADA

1. BERNARDO, S., RESENDE, M. & ARAUJO, J.J. Eficiência de irrigação em sulco com redução da vazão inicial. *Rev. Ceres* 24(133):261-277. 1977.
2. BISHOP, A.A. Relation of intake rate to length of run in surface irrigation. *Transaction of American Society of Civil Engineers*. 127:282-293. 1962.
3. CRIDDLE, W.D., DAVIS, S. & PAIR, C.H. *Methods for evaluating irrigation systems*. Washington. USDA - Soil Conservation Service, 1956. 24 p. (Agriculture handbook N.º 82).
4. FOK, Y. BISHOP A.A. Analysis of water advance in surface irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 91(1):99-116. 1965.
5. ISRAELSEN, W.O., CRIDDLE, W.D., FUHRIMAN, D.K. & HANSEN, V.E. *Water application efficiencies in irrigation*. Logan, Utah Agricultural Experiment Station, 1944. 32 p. (Bol. n.º 311).
6. WILLARDSON, L.S. & BISHOP, A.A. Analysis of surface irrigation application efficiency. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 93(2):21-36. 1967.