

Metodologia de Walker e Skogerboe para avaliação de irrigação por sulcos

01. Medição das variáveis de avaliação:

O principal objetivo da avaliação em sistemas de irrigação por superfície, segundo Walker (1989) é identificar práticas de manejo que possam melhorar a eficiência de irrigação. Para isso alguns dados de campo devem ser coletados, tais como:

- a) hidrógrafa de entrada;
- b) hidrógrafa de saída;
- c) curva de avanço e recessão;
- d) umidade do solo antes da irrigação;
- e) infiltração e capacidade de retenção de água no solo;
- f) geometria da seção transversal da área de fluxo.

1.1. Hidrógrafas:

As vazões de entrada e de saída nos sulcos podem ser medidas através de calhas Parshall de uma polegada, de forma a produzir uma hidrógrafa de entrada e uma hidrógrafa de saída. Deve-se ter o cuidado em manter o fluxo na calha de entrada constante.

De posse dos resultados, confeccionam-se as duas hidrógrafas, e após isso, integram-se para se obter os volumes aplicados e os volumes de runoff.

Duas variáveis são obtidas da comparação das hidrógrafas. Primeiro, o volume infiltrado no solo, pode ser obtido pela diferença entre o valor integrado das duas hidrógrafas.

Deste modo:

$$V_z = V_{en} - V_{saída} \quad (1)$$

em que V_z , V_{en} e $V_{saída}$ são o volume total infiltrado, o volume introduzido na parcela e o volume de escoamento superficial, respectivamente. A segunda variável definida pelas hidrógrafas de entrada e saída é a taxa de infiltração básica, f_0 (em $m^3/min/m$), calculada conforme a seguinte equação:

$$f_0 = \frac{(Q_{en} - Q_{saída})}{L} \quad (2)$$

onde Q_{en} e $Q_{saída}$ são as vazões em m^3/min quando o fluxo atinge uma estabilidade nas calhas de entrada e saída, respectivamente e L é o comprimento do campo em metros.

1.2. Avanço e recessão:

Para a confecção das curvas de avanço e de recessão, instalam-se estacas, em espaços regulares. Durante a fase de avanço, registram-se o tempo em que a água atinge cada estação e para o registro da fase de recessão recomenda-se usar como critério o momento em que a lâmina de água

decrece a mais ou menos a metade da lâmina original. Este procedimento é utilizado para não superestimar o tempo de recessão. Quando for o caso, deve-se instalar uma estaca intermediária para registrar o tempo de avanço.

A trajetória do avanço não tem uma descrição matemática concisa, mais pode ser aproximada por uma função potencial do tipo:

$$x = pt_x^r \quad (3)$$

onde x é a distância do avanço em metros, atingida em t_x minutos e p e r são parâmetros de ajuste. Após a coleta dos dados à campo, utiliza-se a metodologia dos dois pontos proposta por Elliot e Walker (1982), a qual baseia-se no princípio da conservação da massa. Neste método, mede-se o tempo de avanço à metade do campo ($t_{0,5L}$) e ao final (t_L) e resolve-se simultaneamente para definir os parâmetros da equação 3:

$$r = \frac{\log(L/0,5L)}{\log(t_L/t_{0,5L})} \quad (4)$$

e

$$p = \frac{L}{t_L^r} \quad (5)$$

1.3. Geometria do fluxo:

Para se descrever a geometria do sulco utiliza-se um perfilômetro durante a fase de avanço. Segundo a metodologia convencional, deve-se usar o perfilômetro antes e depois da irrigação, e durante esta, anota-se a largura da superfície livre da água e da sua profundidade. No entanto deve-se fazer referidas medições durante as irrigações, quando a forma do sulco se modificar durante a fase de avanço.

Assim sendo, coloca-se o perfilômetro sobre o sulco e com um nível de pedreiro, certifica-se de que este está nivelado. Deixa-se descer uma haste para medir o nível da água, para somente após se medir a forma do sulco.

Plota-se em papel milimetrado a seção do sulco obtida à campo, dividindo-a em 10 a 15 intervalos iguais. Desta seção obtém-se a largura da água na superfície e à metade da lâmina de água. Assim faz-se uma relação entre a largura e a profundidade da seguinte forma:

$$L_2 = \frac{\log(X_{total}/X_{média})}{\log(Y_{total}/Y_{média})} \quad (6)$$

e

$$L_1 = \frac{X_{total}}{(Y_{total})^{L_2}} \quad (7)$$

Faz-se uma relação entre a área e a lâmina de água no sulco, na qual:

$$A = a_1 \cdot Y^{a_2} \quad (8)$$

sendo que:

$$a_1 = \frac{L_1}{L_2 + 1} \quad (9)$$

$$a_2 = L_2 + 1 \quad (10)$$

O cálculo do perímetro molhado de forma mais rigorosa deve ser obtido por integração numérica utilizando-se a seguinte equação:

$$Pm = \sum_{i=0}^n 2 \left\{ [y_i - y_{(i-1)}]^2 + [0,5 \cdot [B_i - B_{(i-1)}]^2] \right\}^{0,5} \quad (11)$$

sendo:

Pm: perímetro molhado em metros

y_i : lâmina no sulco em metros

B_i : largura da superfície livre da água no sulco em metros.

Com esta equação pode-se obter os perímetros molhados total e médio e relacioná-los com a lâmina de água da seguinte maneira:

$$PM = b_1 \cdot Y^{b_2} \quad (12)$$

sendo que:

$$b_2 = \frac{\log(PM_{total} / PM_{médio})}{\log(Y_{total} / Y_{médio})} \quad (13)$$

e

$$b_1 = \frac{PM_{total}}{(Y_{total})^{b_2}} \quad (14)$$

Para o cálculo da área de fluxo na entrada do sulco, utiliza-se a equação de Manning para fluxo uniforme:

$$A_0 = C_1 \left(\frac{Q_0 \cdot n}{60 \cdot S_0^{1/2}} \right)^{C_2} \quad (15)$$

sendo:

$$C_2 = \frac{3a_2}{5a_2 - 2b_2} \quad (16)$$

e

$$C_1 = a_1 \left(\frac{b_1^{0,67}}{a_1^{1,67}} \right)^{C_2} \quad (17)$$

onde C_1 e C_2 são as constantes geométricas do sulco.

1.4. Infiltração:

Para o cálculo das constantes de infiltração de Kostiakov-Lewis (**a** e **K**), utiliza-se a equação do balanço de volume para qualquer tempo da seguinte forma:

$$Q_o t = S_y \cdot A_0 \cdot X + S_z \cdot K \cdot t^a \cdot X + \frac{f \cdot t \cdot X}{1+r} \quad (18)$$

onde Q_o é a vazão de entrada em m^3/min e t é o tempo transcorrido desde o início da irrigação em min, A_0 é a área da seção transversal de fluxo na entrada em m^2 , S_z é o fator de forma definido como:

$$S_z = \frac{a + r(1-a) + 1}{(1+r) \cdot (1+a)} \quad (19)$$

A área da seção transversal do fluxo na entrada A_0 , é calculada como descrito na equação 15.

A equação 18 é escrita para dois pontos do avanço de forma a definir os parâmetros de infiltração **a** e **K**. Os dois pontos do avanço medidos são, à metade do sulco ($L/2$) e ao final do sulco (L). Assim, para a metade do campo, o avanço é:

$$Q_o \cdot t_{0,5L} = \frac{S_y \cdot A_0 \cdot L}{2} + \frac{S_z \cdot K \cdot t_{0,5L}^a}{2} + \frac{f \cdot t_{0,5L} \cdot L}{2(1+r)} \quad (20)$$

e para o final do sulco:

$$Q_o \cdot t_L = S_y \cdot A_0 \cdot L + S_z \cdot K \cdot t_L^a \cdot L + \frac{f \cdot t_L \cdot L}{(1+r)} \quad (21)$$

onde $t_{0,5L}$ é o tempo de avanço à metade do campo em minutos, t_L é o tempo de avanço medido ao final do sulco em minutos e L é o comprimento total do sulco.

Observando-se as equações 20 e 21, somente os parâmetros **K** e **a** são desconhecidos. Resolvendo-se simultaneamente usando uma transformação logarítmica se obtém:

$$a = \frac{\log(V_L / V_{0,5L})}{\log(t_L / t_{0,5L})} \quad (22)$$

sendo:

$$V_L = \frac{Q_o \cdot t_L}{L} - S_y \cdot A_0 - \frac{f \cdot t_L}{(1+r)} \quad (23)$$

e

$$V_{0,5L} = \frac{2Q_o \cdot t_{0,5L}}{L} - S_y \cdot A_0 - \frac{f \cdot t_{0,5L}}{(1+r)} \quad (24)$$

então S_z é obtido diretamente da equação 19 e o parâmetro **K** pode ser obtido por:

$$K = \frac{V_L}{S_z \cdot t_L^a} \quad (25)$$

Os cálculos das lâminas infiltradas em cada estação podem ser realizados mediante a seguinte equação:

$$Z_i = K[(tr)_i - (ta)_i]^a + fo[(tr)_i - (ta)_i] \quad (26)$$

onde $(tr)_i$ e $(ta)_i$ são os tempos de recessão e tempo de avanço na estação i respectivamente. K , a e f_0 são determinados de acordo com as equações 25, 22 e 2. A diferença entre $(tr)_i$ e $(ta)_i$ define o tempo de oportunidade de infiltração. Z_i é a lâmina infiltrada no ponto i em m^3/m .

1.5. Cálculo dos volumes infiltrados:

Segundo Walker e Skogerboe (1987) e Walker (1989) uma irrigação por superfície pode resultar em três situações típicas de lâminas infiltradas no perfil do solo: a) irrigação com déficit, b) irrigação completa, e c) irrigação em excesso.

Quando a vazão de entrada é cortada pouco tempo após se completar a fase de avanço, em alguns pontos ao longo do sulco a lâmina infiltrada será insuficiente para atender o déficit de umidade do solo. Outras vezes, se fornece a lâmina requerida na parte que se recebe a menor quantidade de água e, finalmente, e mais freqüentemente, as lâminas aplicadas excedem, em todos os pontos, a lâmina requerida.

Para os casos b e c, o volume total infiltrado ao longo do sulco pode ser calculado integrando-se a distribuição superficial da umidade mediante a regra do trapézio:

$$V_Z = \frac{L}{2n} (Z_0 + 2Z_1 + 2Z_2 + \dots + 2Z_{n-1} + Z_n) \quad (27)$$

onde L é o comprimento do sulco em metros, Z_i são as lâminas acumuladas no ponto i em m^3/m e n é o número de incrementos usados para subdividir o sulco.

Quando se tem uma situação de déficit de irrigação na parte final do sulco, calcula-se o volume infiltrado em dois segmentos do sulco. Primeiro se determina graficamente a posição X_d . Em seguida define-se as áreas irrigadas adequadamente e inadequadamente. Então, utilizando-se a equação 27, integra-se volume infiltrado sobre a área adequadamente irrigada (V_{za}) e depois o volume infiltrado sobre a área com déficit (V_{zi}), de tal modo que o volume infiltrado total é:

$$V_Z = V_{za} + V_{zi} \quad (28)$$

Após os cálculos dos volumes infiltrados obtidos através da metodologia descrita até aqui, compara-se com os volumes infiltrados médios obtidos pela diferença entre os volumes aplicados e os volumes escoados, de acordo com a equação 3.1. Este procedimento é recomendado por Walker (1989) para se ter uma maior precisão dos resultados.

1.6. Medidas de desempenho do sistema:

As medidas de desempenho utilizadas para avaliar a irrigação são: eficiência de aplicação (E_a); índice de runoff (I_{ro}); índice de percolação (I_p); eficiência de armazenamento (E_s) e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).

Para o cálculo das eficiências de aplicação (E_a) e de armazenamento (E_s) utilizam-se dois critérios: Primeiro para o caso de irrigação completa ou em excesso, E_a será calculada por:

$$E_a = \frac{Z_{req} \cdot L}{Q_o \cdot t_{co}} \quad (29)$$

onde Z_{req} é a lâmina de aplicação requerida nos sulcos em m^3/m e equivalente ao déficit de umidade no solo antes da irrigação. L é o comprimento do sulco, Q_o é a vazão média aplicada em m^3/min e t_{co} é o tempo de corte em minutos. Neste caso, a eficiência de armazenamento é de 100%.

Para o caso de irrigação com déficit a eficiência de aplicação será calculada do seguinte modo:

$$E_a = \frac{Z_{req} \cdot Xd + V_{zi}}{Q_o \cdot t_{co}} \cdot 100 \quad (30)$$

onde Xd é a distância em metros que divide a área com irrigação satisfatória, da área com déficit e V_{zi} é o volume infiltrado sobre a área inadequadamente irrigada.

Com relação à eficiência de armazenamento (E_s), neste caso é calculada por:

$$E_s = \frac{Z_{req} \cdot Xd + V_{zi}}{Z_{req} \cdot L} \cdot 100 \quad (31)$$

O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) deve ser calculado, não importando se a irrigação é uma irrigação completa ou em excesso, ou um caso de irrigação com déficit, utilizando-se a equação a seguir:

$$CUC = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Z_i - \bar{Z}|}{n \cdot \bar{Z}} \right] \cdot 100 \quad (32)$$

Sendo:

Z_i : lâmina infiltrada no ponto i

\bar{Z} : lâmina média infiltrada

n : nº de observações utilizadas.

Para se definir os índices de perdas por percolação profunda e por escoamento superficial utilizam-se as seguintes equações:

$$I_p = \frac{V_{pp}}{V_a} \cdot 100 \quad (33)$$

$$I_{ro} = \frac{V_{ro}}{V_a} \cdot 100 \quad (34)$$

sendo:

I_p : índice de percolação

V_{pp} : volume percolado abaixo da zona de raízes

I_{ro} : índice de "runoff"

V_{ro} : volume perdido por escoamento no final da parcela

V_a : volume de água aplicado.