

Modelo recursivo de Hall - Davis: Algoritmos em Basic e para HP - 15C

Durval Dourado Neto (1)

INTRODUÇÃO

O processo de irrigação típico apresenta quatro fases distintas: AVANÇO, REPOSIÇÃO, DEPLEÇÃO e RECESSO, conforme ilustra a FIGURA 02.

A fase de AVANÇO é a mais crítica do processo de irrigação, por apresentar a razão de infiltração em níveis relativamente elevados quando comparados com outras fases, pois o tempo é inversamente proporcional à razão de infiltração:

$$z = k t^a; \text{onde: } 0 < a < 1; \text{(I)}$$

z = lâmina infiltrada (m);

t_i = tempo de oportunidade para infiltração (s);

k e a = parâmetros empíricos (coeficientes angular e linear, respectivamente, da equação de infiltração), ($k = m.s^{-a}$), e

$$\frac{dz}{dt} = k a t^{a-1}; \text{onde: } a-1 < 0; \text{(I-A)}$$

$$\frac{dz}{dt} = \text{razão de infiltração (m. s}^{-1}\text{)}.$$

O modelo recursivo de Hall-Davis permite simular, com certa precisão, a fase de avanço, o que, indubitavelmente, é uma excelente ferramenta para o dimensionamento criterioso de projetos de irrigação de superfície (sulcos e faixas de infiltração), com a vantagem da economia de tempo e recursos financeiros, e de se estabelecer nível de eficiência competitivo em relação a outros sistemas de irrigação. Para a sua utilização é imprescindível que se conheçam e se compreendam os critérios adotados.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar algoritmos (BASIC e HP-15C) para utilização do modelo proposto por HALL (1956) e DAVIS (1960).

ASPECTOS TEÓRICOS FUNDAMENTAIS

Durante a fase de avanço não há perdas por deflúvio superficial. Sendo assim, para a referida fase tem-se o seguinte balanço volumétrico:

$$V_t = V_y + V_z; \text{(II)}$$

onde:

V_t = volume aplicado (m^3);

V_y = volume armazenado superficialmente (m^3);

V_z = volume infiltrado (m^3).

Assumindo o intervalo de tempo DT constante, tem-se, no primeiro instante, (t_1) (vide FIGURA 03):

$$Q \cdot DT = (A_{y1} \cdot r_y + A_{z1} \cdot r_z) \cdot DX_1; \text{(III)}$$

onde:

DT = intervalo de tempo (s);

DX_1 = intervalo de avanço (m);

Q = vazão ($m^3.s^{-1}$);

A_{y1} = área transversal ao escoamento armazenada superficialmente (m^2);

r_y = fator de forma;

A_{z1} = área transversal infiltrada (m^2);

r_z = fator de forma.

Sendo assim:

$$DX_1 = \frac{Q \cdot DT}{A_{y1} \cdot r_y + A_{z1} \cdot r_z}; \text{(IV)}$$

No segundo instante (t_2) (vide FIGURA 03) tem-se:

$$DX_2 = \frac{Q \cdot DT}{A_{y1} \cdot r_y + A_{z1} \cdot r_z} -$$

$$\frac{(A_{z2} - A_{z0}) \cdot DX_1}{2 \cdot (A_{y1} \cdot r_y + A_{z1} \cdot r_z)}; \text{(V)}$$

De forma mais elucidativa, no terceiro instante (t_3) (Vide FIGURA 03), tem-se que:

$$V_{z3} = \frac{(A_{z3} - A_{z2}) + (A_{z2} - A_{z1})}{2}$$

$$DX_1 + \frac{(A_{z2} - A_{z1}) + (A_{z1} - A_{z0})}{2}$$

$$DX_2 + A_{z1} r_z DX_3; \text{(VI)}$$

$$V_{y3} = A_{y1} \cdot r_y \cdot DX_3; \text{(VII)}$$

De acordo com a Equação II, deduz-se que:

$$DX_3 = \frac{Q \cdot DT}{A_{z1} \cdot r_z + A_{y1} \cdot r_y} - \frac{(A_{z3} - A_{z1}) DX_1 + (A_{z2} - A_{z0}) DX_2}{2 \cdot A_{z1} r_z + A_{y1} r_y}; \text{(VIII)}$$

Generalizando para qualquer instante (t_i), tem-se:

$$DX_i = \frac{Q \cdot DT}{A_{z1} r_z + A_{y1} r_y} - \frac{\sum_{k=1}^{i-1} (A_{z1-k+1} - A_{z1-k}) DX_k}{2 \cdot (A_{z1} r_z + A_{y1} r_y)}; \text{(IX)}$$

Assumindo que a lâmina no ponto de derivação é normal com gradiente de declive não nulo, tem-se, por Gauckler-Manning:

$$y_{no} = \left| \frac{Q \cdot (m+1)^{5/3}}{S_0^{1/2}} \right|^{3/(3 \cdot m + 5)} \cdot n; \text{(X), onde:}$$

y_{no} = lâmina superficial normal no ponto de derivação (m);

S_0 = declividade ($m.m^{-1}$);

n = coeficiente de rugosidade hidráulica de Manning.

Sendo a equação que define a geometria do sulco do tipo potencial:

$B = c \cdot y^m$; (XI), onde:

B = largura da superfície livre no sulco de irrigação (m);

c e m = parâmetros empíricos. Coeficientes angular e linear, respectivamente, quando a Equação XI é linearizada

($c = m.m^{-m}$), temos que:

$$Ay = \int_y^y B \cdot dy; \text{(XII)}$$

Substituindo o valor de B dado pela Equação XI, deduz-se que:

$$Ay = \frac{c}{m+1} y^{m+1}; \text{(XIII)}$$

(1) Engenheiro Agrônomo. DBA/2ª D.R./CODEVASF. Barreiras-BA.

Sendo assim, pode-se estimar o volume de água superficial (V_y) pela seguinte expressão:

$$V_y = \int_0^y A_y \cdot ds; \text{ (XIV)}$$

Assumindo:

$$y = y_{no} \left(1 - \frac{s}{x}\right)^b; \text{ (XV), onde:}$$

s = distância de avanço (m);

x = comprimento da parcela (m);

b = parâmetro empírico.

Substituindo o valor da lâmina y na Equação XIII, tem-se que:

$$A_y = \frac{c}{m+1} \left(1 - \frac{s}{x}\right)^b (m+1) \cdot y_{no}^{m+1} \text{ (XVI)}$$

Substituindo na Equação XIV, tem-se

$$V_y = \int_0^x \left(1 - \frac{s}{x}\right)^b (m+1) \cdot ds; \text{ (XVII)}$$

Sendo:

$$\mu = 1 - \frac{s}{x}; \text{ (XVIII)}$$

$$d\mu = -\frac{ds}{x}; \text{ (XIX)}$$

Sendo verificados os limites da integração e multiplicando o segundo termo da expressão por " $\frac{x}{x}$ ", temos:

$$V_y = A_{y0} \cdot x \cdot \int_0^1 \mu^b (m+1) \cdot d\mu; \text{ (XX)}$$

$$V_y = A_{y0} \cdot x \cdot \frac{1}{b(m+1)+1} =$$

$$V_{y0} \cdot \frac{1}{b(m+1)+1}; \text{ (XXI)}$$

Pela Equação (XXI), verifica-se facilmente que:

$$r_y = \frac{1}{b(m+1)+1}; \text{ (XXII)}$$

A Equação XXII é genérica para faixas e sulcos. Particularmente para faixas de infiltração, tem-se:

$$r_y = \frac{1}{b+1}; \text{ (XXIII), pois } m = 0.$$

Utilizando valores disponíveis na prática, através de observações empíricas, usualmente adota-se $b = 0,25$ ($r_y = 0,8$). Porém, o valor de r_y pode ser também adotado, variando no intervalo de 0,65 a 0,85.

Para estimativa do volume infiltrado, tem-se que:

$$V_z = \int_0^x A_z \cdot ds; \text{ (XXIV), onde:}$$

$$A_z = P_m \cdot k \cdot t_1^a = P_m \cdot z; \text{ (XXV)}$$

$$A_{zT} = w \cdot z_T; \text{ (XXVI)}$$

P_m = perímetro molhado (m);

w = largura característica (m);

z_T = lâmina infiltrada requerida (m);

A_{zT} = área infiltrada requerida (m^2).

Para determinação do tempo de oportunidade para infiltração (t_i), que corresponde ao tempo necessário para aplicar a lâmina requerida (z_T), é necessário igualar a área infiltrada (A_z) (Equação XXV) à área infiltrada requerida (A_{zT}) (Equação XXVI). Se o tempo de oportunidade para infiltração for calculado pela Equação I, o seu valor será subestimado e a lâmina requerida não será aplicada. Esse parece ser um erro corriqueiro no dimensionamento de projetos de irrigação por sulcos.

$$r_z = \frac{w}{w_0} \cdot \frac{G(h+1) \cdot G(a+1)}{(h+a) \cdot G(h+a)}; \text{ (XXVII)}$$

$$V_z = A_{z0} \cdot x \cdot r_z; \text{ (XXVIII)}$$

$$G(h+1) = h!; G(a+1) = a!; G(h+a) = (h+a-1)!; \text{ (XXIX)}$$

h = parâmetro empírico (equação de avanço).

Para o cálculo de r_z , é necessário conhecer o valor de h (coeficiente angular da equação de avanço quando linearizada). Para tal, é necessário conhecer a equação de avanço, a qual demanda tempo e tem que ser determinada através de testes de campo. Para cada vazão, um teste diferente. No intuito de simplificar os cálculos, assumiu-se inicialmente o avanço linear ($h = 1$). Sendo assim, tem-se de forma genérica que:

$$r_z = \frac{w}{w_0} \cdot \frac{1}{a+1}; \text{ (XXX)}$$

Particularmente para faixas:

$$r_z = \frac{1}{a+1}; \text{ (XXXI),}$$

$$\text{pois } \frac{w}{w_0} = 1.$$

Posteriormente, faz-se a regressão após o cálculo dos intervalos de avanço devidamente tabulados.

$$S_i = \sum_{j=1}^i DX_j; \text{ (XXXII)}$$

$$S = f \cdot t^h; \text{ (XXXIII)}$$

f e h = parâmetros empíricos.

$$\log S = \log f + h \cdot \log t; \text{ (XXXIV)}$$

Sendo:

$Y = \log S$; $B = \log f$; $A = h$ e $X = \log t$, tem-se a equação de avanço linearizada:

$$Y = B + A \cdot X; \text{ (XXXV)}$$

Isso permite ao projetista simular o avanço para diferentes vazões. Após a simulação, convém averiguar no campo a equação de avanço obtida. Geralmente a precisão é boa. Essa é a grande vantagem do método.

ALGORITMO EM MBASIC

O referido algoritmo aplica-se apenas à fase de avanço, para faixas e sulcos em declive.

Os dados de entrada para o algoritmo em MBASIC são os seguintes: 1. constante empírica b ; 2. tempo (s); 3. vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$); 4. coeficientes angular e linear da equação que define a geometria do sulco ($B = c \cdot y^m$), e da equação de infiltração do tipo Kostiakov-Lewis ($z = k \cdot t_1^a$) ($k = m \cdot s^{-a}$); 5. declividade ($m \cdot m^{-1}$); 6. perímetro molhado médio (m) e no ponto de derivação (m); 7. coeficiente de rugosidade hidráulica de Manning.

O problema se resume em resolver a Equação IX. Para tal, alguns critérios precisam ser definidos: 1. o intervalo de tempo é assumido constante (s) ($DT = 300$ s por exemplo); 2. a vazão é fixada previamente ($Q = m^3 \cdot s^{-1}$). A simulação é feita para uma dada vazão, a qual pode ser manipulada de acordo com a conveniência do projetista; 3. a área infiltrada (A_{z1}), fator de forma r_z e r_y e a área armazenada superficialmente (A_{y1}) são calculadas conforme as equações XXV, XXX, XXII e XIII, respectivamente.

Observa-se facilmente que o valor numérico da expressão " $A_{y1} \cdot r_y + A_{z1} \cdot r_z$ " é uma constante.

$$CE = A_{y1} \cdot r_y + A_{z1} \cdot r_z; \text{ (XXXVI)}$$

Sendo assim, a Equação IX pode ser escrita da seguinte forma:

$$DX_i = \frac{Q \cdot DT}{CE}$$

$$\sum_{k=1}^{i-1} (A_{z_{i-k+1}} - A_{z_{i-k-1}}) \cdot DX_k = \frac{2 \cdot CE}{Q \cdot DT}; \text{ (XXXIX)}$$

O numerador do segundo termo da Equação XXXIX pode ser resolvido utilizando o seguinte artifício (vide algoritmo em MBASIC):

$$DI(k) = A_z(k+1) - A_z(k-1); \text{ (XL)}$$

$$S(k, j) = DI(k) \cdot DX(j); \text{ (XLI)}$$

$$S(j, k) = DI(j) \cdot DX(k); \text{ (XLII)}$$

$$V(p) = S(j, k) + S(k, j); \text{ (XLIII)}$$

$$T = V(y) + T; \text{ (XLIV)}$$

$$T(h) = T; \text{ (XLV)}$$

$$DX(k) = DX(1) - T(k-1)/2 \cdot CE; \text{ (XLVI)}$$

Esquemáticamente, o corpo dedutivo do algoritmo em MBASIC está ilustrado na FIGURA 01.

Os dois primeiros termos foram calculados separadamente. Os termos de ordem ímpar foram calculados primeiro. Posteriormente, calcularam-se os de ordem par.

```

10 'DURVAL DOURADO NETO
20 ' MODELO RECURSIVO DE HALL-DAVIS
30 REM FASE DE AVANCO - FAIXAS E SULCOS EM DECLIVE
40 PRINT "ENTRE COM (1) P/ FAIXAS OU (2) P/ SULCOS=";:INPUT DD
50 PRINT "ENTRE COM BETA=";:INPUT B
60 PRINT "ENTRE COM VAZAO(M^3/S)=";:INPUT Q
70 PRINT "ENTRE COM M(GEOM. DO SULCO)(COEF. ANGULAR)=";:INPUT M
80 PRINT "ENTRE COM C(GEOM. DO SULCO)(COEF. LINEAR)=";:INPUT C
90 PRINT "ENTRE COM INTERVALO DE TEMPO(S)=";:INPUT DT
100 PRINT "ENTRE COM N(RUGOSIDADE-MANNING)=";:INPUT NN
110 PRINT "ENTRE COM A(KOSTIAKOV-LEWIS)(COEF. ANGULAR)=";:INPUT A
120 PRINT "ENTRE COM KL(KOST.-LEWIS)(M/S^A)(COEF. LIN.)=";:INPUT KL
130 PRINT "ENTRE COM DECLIVIDADE(M/M)=";:INPUT S0
140 PRINT "ENTRE COM WM(PERIMETRO MOLHADO MEDIO)=";:INPUT WM
150 PRINT "ENTRE COM W0(PRIM. MOLHADO NO PONTO DE DERIV.)=";:INPUT W0
160 PRINT "ENTRE COM I(NUMERO DE TERMOS)=";:INPUT I
170 DIM X(I),TE(I),DT(I),DX(I),DI(I),AZ(I),AY(I),S(I+50,I+50),V(I+725),T(I+725)
180 Y0=((Q*((M+1)^(5/3))*NN)/(C*S0^.5))^(3/(3*M+5)):RY=1/(B*(M+1)+1)
190 RZ=WM/(W0*(A+1)):AY(1)=W0*Y0
200 FOR K=1 TO I
210 CU=CU+DT:DT(K)=CU:AZ(K)=WM*KL*DT(K)^A
220 NEXT K
230 CE=AY(1)*RY+AZ(1)*RZ:DX(1)=Q*DT(1)/CE
240 FOR K=1 TO I-1
250 DI(K)=AZ(K+1)-AZ(K-1)
260 NEXT K
270 CN=CN+1
280 FOR K=1 TO CN
290 FOR J=1 TO K
300 S(K,J)=DI(K)*DX(J):S(J,K)=DI(J)*DX(K)
310 NEXT J
320 NEXT K
330 FOR K=1 TO CN
340 FOR J=1 TO K
350 P=P+1
360 V(P)=S(J,K)+S(K,J)
370 NEXT J
380 NEXT K
390 P=P-D+1
400 FOR K=2 TO CN
410 D=D+K
420 V(D)=V(D)/2
430 NEXT K
440 T(1)=V(1)/2:T(2)=V(2):W=1:Z=1:V=1:F=1:H=3:S=0:N=0
450 FOR K=2 TO CN
460 W=W+K:N=N+1:L=W+Z:V=V+3:Z=Z+V
470 Y=W+S:T=V(Y)+T:S=S+F:F=F+1
480 IF Y<L THEN GOTO 470
490 T(H)=T:H=H+2:T=0:F=F-N:S=0
500 NEXT K
510 S=0:Y=0:N=0:L=0:W=2:Z=2:V=2:F=2:H=4
520 FOR K=3 TO CN
530 W=W+K:N=N+1:L=W+Z:V=V+3:Z=Z+V
540 Y=W+S:T=V(Y)+T:S=S+F:F=F+1
550 IF Y<L THEN GOTO 540
560 T(H)=T:H=H+2:T=0:F=F-N:S=0
570 NEXT K
580 FOR K=2 TO CN
590 DX(K)=DX(1)-T(K-1)/(2*CE)
600 NEXT K
610 IF DX(I)<>0 THEN GOTO 630
620 GOTO 270
630 FOR K=1 TO I
640 YC=DX(K)+YC
650 X(K)=YC

```

```

660 NEXT K
670 FOR K=1 TO I
680 TE(K)=DT(K)/60
690 NEXT K
700 FOR K=1 TO I
710 DX(K)=INT((DX(K))*100)/100
720 X(K)=INT((X(K))*100)/100
730 NEXT K
740 HOME:INPUT "TECLE (V) P/ VIDEO, P P/ IMPRESSORA OU F P/ FIM",IS
750 IF IS="F" OR IS="f" THEN END
760 IF IS="V" OR IS="v" OR IS="P" OR IS="p" THEN GOTO 770 ELSE GOTO 740
770 HOME:IF IS="V" OR IS="v" THEN GOTO 890
780 IF DD=1 THEN LPRINT;TAB(15);"MODELO RECURSIVO DE HALL-DAVIS (IRRIGACAO POR FAIXAS)" ELSE LPRINT;TAB(15);"MODELO RECURSIVO DE
ALL-DAVIS (IRRIGACAO POR SULCOS)"
790 LPRINT
800 LPRINT;TAB(5);"INT. AVANCO(M)";" - ";"INT TEMPO(S)";" - ";"AVANCO(M)";" - ";"INT TEMPO(MIN)"
810 LPRINT
820 LPRINT:FOR K=1 TO I:LPRINT;"DX(";K;")=";TAB(20-LEN(STR$(DX(K))))DX(K);" - ";"DT(";K;")=";TAB(44-LEN(STR$(DT(K))))DT(K);"
- ";"X(";K;")=";TAB(67-LEN(STR$(X(K))))X(K);" - ";"TE(";K;")=";TAB(93-LEN(STR$(TE(K))))TE(K):NEXT K
830 LPRINT:LPRINT;TAB(5);"BETA=";B;" - ";"INTERVALO DE TEMPO=";DT;" (S)";" - ";"VAZAO=";Q;" (M^3/S)"
840 LPRINT:LPRINT;TAB(5);"M(GEOMETRIA DO SULCO)(COEFICIENTE ANGULAR)=";M;" - ";"C(GEOMETRIA DO SULCO)(COEFICIENTE LINEAR)
=";C;" (M/M^A)"
850 LPRINT:LPRINT;TAB(5);"A(KOSTIAKOV-LEWIS)(COEFICIENTE ANGULAR)=";A;" - ";"KL(KOSTIAKOV-LEWIS)(COEFICIENTE LINEAR)=";
;" (M/S^A)"
860 LPRINT:LPRINT;TAB(5);"N(RUGOSIDADE HIDRAULICA)(MANNING)=";NN;" - ";"S0(DECLIVIDADE)=";S0;" (M/M)";" - ";"W0=";W0;" (M)";"
- ";"WM=";WM;" (M)"
870 INPUT "TECLE RETURN PARA CONTINUAR",IS
880 GOTO 740
890 PRINT;TAB(18);"MODELO RECURSIVO DE HALL-DAVIS":PRINT:PRINT:PRINT
900 FOR K=1 TO I:PRINT;"DX(";K;")=";TAB(19-LEN(STR$(DX(K))))DX(K);" - ";"DT(";K;")=";TAB(38-LEN(STR$(DT(K))))DT(K);" - ";"X(";K;
=";TAB(57-LEN(STR$(X(K))))X(K);" - ";"TE(";K;")=";TAB(74-LEN(STR$(TE(K))))TE(K):NEXT K
910 INPUT "TECLE RETURN PARA CONTINUAR",IS
920 GOTO 740

```

MODELO RECURSIVO DE HALL-DAVIS (IRRIGACAO POR FAIXAS)

INT. AVANCO(M) - INT TEMPO(S) - AVANCO(M) - INT TEMPO(MIN)

DX(1)= 21.13	-	DT(1)= 300	-	X(1)= 21.13	-	TE(1)= 5
DX(2)= 17.18	-	DT(2)= 600	-	X(2)= 38.32	-	TE(2)= 10
DX(3)= 15.48	-	DT(3)= 900	-	X(3)= 53.81	-	TE(3)= 15
DX(4)= 14.22	-	DT(4)= 1200	-	X(4)= 68.03	-	TE(4)= 20
DX(5)= 13.22	-	DT(5)= 1500	-	X(5)= 81.26	-	TE(5)= 25
DX(6)= 12.41	-	DT(6)= 1800	-	X(6)= 93.67	-	TE(6)= 30
DX(7)= 11.72	-	DT(7)= 2100	-	X(7)= 105.39	-	TE(7)= 35

BETA= .428571 - INTERVALO DE TEMPO= 300 (S) - VAZAO= .003 (M^3/S)

M(GEOMETRIA DO SULCO)(COEFICIENTE ANGULAR)= 0 - C(GEOMETRIA DO SULCO)(COEFICIENTE LINEAR)= 1 (M/M^A)

A(KOSTIAKOV-LEWIS)(COEFICIENTE ANGULAR)= .6 - KL(KOSTIAKOV-LEWIS)(COEFICIENTE LINEAR)= .000343 (M/S^A)

N(RUGOSIDADE HIDRAULICA)(MANNING)= .15 - S0(DECLIVIDADE)= .004 (M/M) - W0= 1 (M) - WM= 1 (M)

MODELO RECURSIVO DE HALL-DAVIS – HP-15C

O algoritmo II só é válido para faixas de infiltração. Para sua utilização para sulcos, as seguintes alterações devem ser feitas:

RETIRAR: Linhas 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58.

ACRESCENTAR: R/S – Ay₁

RETIRAR: Linhas 62, 63, 64 e 65.

ACRESCENTAR: R/S – rz

Os dados de entrada para o algoritmo II para HP-15C são os seguintes:

A. Antes da execução do programa:

1) K (m/s³) (coef. linear) (Kostiakov-Lewis): STO. 0

2) a (coeficiente angular) (Kostiakov-

Lewis): STO. 1

B. Executando o programa:

1) Tempo (s). Entrada: Linhas 2, 8, 14, 20, 26, 32, 38 e 44, referentes aos tempos t₁, t₂, t₃, t₄, t₅, t₆, t₇ e t₈, respectivamente. Onde: t_i = i. DT. Se, por exemplo, DT = 300 s, então:

t₁ = 1.300 = 300 s

t₂ = 2.300 = 600 s

t₃ = 3.300 = 900 s

t₈ = 8.300 = 2400 s

Apenas o tempo t₁ terá uma nova entrada na linha 69.

2) Vazão (m³/s). Entrada: Linhas 50 e 68.

3) Coeficiente de rugosidade hidráulica de Maning. Entrada: Linha 51.

4) Declividade (m/m). Entrada: Linha 53.

5) Fator de forma ry. Entrada: Linha 59.

O resultado é fornecido nas linhas 74, 86, 104, 128, 158, 194, 236 e 284, correspondentes aos valores de DX₁, DX₂, DX₃, DX₄, DX₅, DX₆, DX₇ e DX₈ (em metros), respectivamente.

O presente algoritmo possui a limitação de calcular apenas até o oitavo intervalo de distância de avanço (DX₈). Para contornar essa limitação, deve-se-á adotar valor de intervalo de tempo (DT) tanto maior quanto maior for o comprimento da parcela (LI), e/ou menor for a declividade, e/ou maior for a capacidade de infiltração do solo.

ALGORITMO II – (HP-15C) – (FAIXAS DE INFILTRAÇÃO)

– ENTRADA

. SAÍDA

1. f LBL A	49. sto 8	98. x	146. rcl 2	194. R/S . DX ₆ (m)	242. rcl 7
2. R/S – t ₁ (s)	50. R/S – Q (m ³ /sm)	99. ÷	147. rcl. 4	195. rcl 7	243. rcl 5
3. rcl. 1	51. R/S – n (rugos.)	100. rcl 0	148. x	196. rcl 5	244. –
4. y ^x	52. x	101. –	149. +	197. –	245. rcl 9
5. rcl.0	53. R/S – S ₀ (m/m)	102. CHS	150. rcl. 2	198. rcl 0	246. x
6. x	54. √ x	103. sto. 3	151. 2	199. x	247. +
7. sto 1	55. ÷	104. R/S . DX ₃ (m)	152. x	200. rcl 6	248. rcl 6
8. R/S – t ₂ (s)	56. .6	105. rcl 4	153. ÷	201. rcl 4	249. rcl 4
9. rcl. 1	58. y ^x	106. rcl 2	154. CHS	202. –	250. –
10. y ^x	59. R/S – ry	107. –	155. rcl 0	203. rcl 9	251. rcl. 3
11. rcl. 0	60. x	108. rcl 0	156. +	204. x	252. x
12. x	61. rcl 1	109. x	157. sto. 5	205. +	253. +
13. sto 2	62. rcl. 1	110. rcl 3	158. R/S . DX ₅ (m)	206. rcl 5	254. rcl 5
14. R/S – t ₃ (s)	63. 1	111. rcl 1	159. rcl 6	207. rcl 3	255. rcl 3
15. rcl. 1	64. +	112. –	160. rcl 4	208. –	256. –
16. y ^x	65. ÷	113. rcl 9	161. –	209. rcl. 3	257. rcl. 4
17. rcl. 0	66. +	114. x	162. rcl 0	210. x	258. x
18. x	67. sto. 2	115. +	163. x	211. +	259. +
19. sto 3	68. R/S – Q (m ³ /sm)	116. rcl 2	164. rcl 5	212. rcl 4	260. rcl 4
20. R/S – t ₄ (s)	69. R/S – t ₁ (s)	117. rcl. 3	165. rcl 3	213. rcl 2	261. rcl 2
21. rcl. 1	70. x	118. x	166. –	214. –	262. –
22. y ^x	71. rcl. 2	119. +	167. rcl 9	215. rcl. 4	263. rcl. 5
23. rcl. 0	72. ÷	120. rcl. 2	168. x	216. x	264. x
24. x	73. sto 0	121. 2	169. +	217. +	265. +
25. sto 4	74. R/S . DX ₁ (m)	122. x	170. rcl 4	218. rcl 3	266. rcl 3
26. R/S – t ₅ (s)	75. rcl 2	123. ÷	171. rcl 2	219. rcl 1	267. rcl 1
27. rcl. 1	76. rcl. 0	124. CHS	172. –	220. –	268. –
28. y ^x	77. x	125. rcl 0	173. rcl. 3	221. rcl. 5	269. rcl. 6
29. rcl. 0	78. rcl. 2	126. +	174. x	222. x	270. x
30. x	79. 2	127. sto. 4	175. +	223. +	271. +
31. sto 5	80. x	128. R/S . DX ₄ (m)	176. rcl 3	224. rcl 2	272. rcl 2
32. R/S – t ₆ (s)	81. ÷	129. rcl 5	177. rcl 1	225. rcl. 6	273. rcl. 7
33. rcl. 1	82. CHS	130. rcl 3	178. –	226. x	274. x
34. y ^x	83. rcl. 0	131. –	179. rcl. 4	227. +	275. +
35. rcl. 0	84. +	132. rcl 0	180. x	228. rcl. 2	276. rcl. 2
36. x	85. sto 9	133. x	181. +	229. 2	277. rcl. 2
37. sto 6	86. R/S . DX ₂ (m)	134. rcl 4	182. rcl 2	230. x	277. 2
38. R/S – t ₇ (s)	87. rcl 3	135. rcl 2	183. rcl. 5	231. ÷	278. x
39. rcl. 1	88. rcl. 1	136. –	184. x	232. CHS	279. ÷
40. y ^x	89. –	137. rcl 9	185. +	233. rcl 0	280. CHS
41. rcl. 0	90. rcl. 0	138. x	186. rcl. 2	234. +	281. rcl 0
42. x	91. x	139. +	187. 2	235. sto. 7	282. +
43. sto 7	92. rcl. 2	140. rcl 3	188. x	236. R/S . DX ₇ (m)	283. sto. 8
44. R/S – t ₈ (s)	93. rcl. 9	141. rcl 1	189. ÷	237. rcl 8	284. R/S . DX ₈ (m)
45. rcl. 1	94. x	142. –	190. CHS	238. rcl 6	285. g RTN
46. y ^x	95. +	143. rcl. 3	191. rcl 0	239. –	g P/R
47. rcl. 0	96. rcl. 2	144. x	192. +	240. rcl 0	
48. x	97. 2	145. +	193. sto. 6	241. x	

EXEMPLO (HP-15C)

Determinar a equação de avanço da água em uma faixa nas seguintes condições (cultura: Alfafa semeada a lanço)

Vazão: $31 \text{ s.m} = 0.003 \text{ m}^3/\text{s.m}$
Gradiente de declive: $0.4\% = 0.004 \text{ m/m}$

Coefficiente de rugosidade: $n = 0.15$
Equação de infiltração:
 $z = k \cdot t^a$; ($z = \text{cm}$) ($t = \text{min}$) $z = 0,4$

Comprimento da parcela: $L = 100 \text{ m}$

Assumir intervalo de tempo $DT = 300 \text{ s}$

RESOLUÇÃO:

Passo 1: Adotar valor de $r_y = 0.7$

Passo 2: Cálculo de rz

$$rz = \frac{1}{1+a} = \frac{1}{1+0.6} = 0.625$$

Passo 3: Transformação de unidades (Sistema MKS)

$$K = 0.4 \text{ cm/min}^a = \frac{0.4 \cdot 10^{-2} \text{ m}}{0.6} \quad (60 \text{ s})$$

$$K = 0.000343 \text{ m/s}^a$$

$$\text{Passo 4: } Ay_1 = y_n = (Q \cdot n / S_0^{1/2})^{3/5} = 0.051441 \text{ m}^2$$

$$\text{Passo 5: } Az_i = z_i = K \cdot t^a$$

$$\text{Passo 6: Cálculo de } DX_i \text{ (m)}$$

O segundo, quarto, quinto e sexto passos são executados pela máquina calculadora HP-15C (Hewlett-Packard).

RESPOSTA:

i	$DX_i \text{ (m)}$	$t_i \text{ (s)}$	$s \text{ (m)}$
1	21.14	300	21.14
2	17.18	600	38.32
3	15.49	900	53.81
4	14.22	1200	68.03
5	13.23	1500	81.26
6	12.41	1800	93.67
7	11.72	2100	105.39

$$s = f \cdot t^h$$

$$\log s = \log f + h \cdot \log t$$

$$Y = B + A \cdot X$$

$$B = \log f = -0.715 \quad f = 0.193 \text{ m/s}^h$$

$$A = h = 0.826$$

$$r^2 = 0.999796583$$

$$s = 0.193 t^{0.826}; (s = \text{m}) (t = \text{s})$$

ou

$$0.193 \text{ m}$$

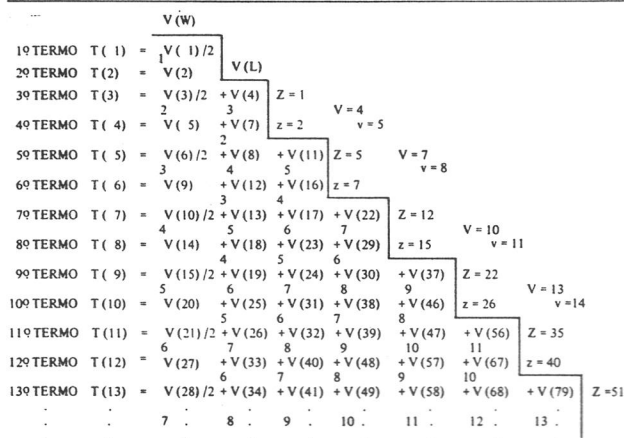
$$f = \frac{5.68 \text{ m/min}^h}{(60-1 \text{ min})^{0.826}}$$

$$s = 5.68 t^{0.826}; (s = \text{m}) (t = \text{min})$$

TABELA 01: Valores do Coeficiente de rugosidade hidráulica de Manning (n) DISCRIMINAÇÃO

0.04	Superfície do solo regularizada
0.10	Cereais de pequeno porte (trigo e cevada) em linhas de plantio dispostas longitudinalmente
0.15	Alfafa e cereais semeados a lanço
0.25	Gramíneas forrageiras com crescimento rasteiro e cereais de pequeno porte semeados com linhas de plantio transversais ao escoamento.

FONTE: SCALOPPI, E. J., 1986. Notas de aula.



W = Limite inferior

L = Limite superior

$Z = L - W$; $Z = \text{Ref. aos termos de ordem par}$

$z = \text{Ref. aos termos de ordem ímpar}$

FIGURA 01.

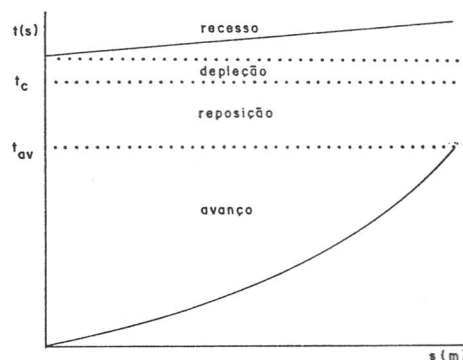


FIGURA 02

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, pretendeu-se transmitir, ainda que sucintamente, alguns aspectos teóricos fundamentais que subsidiam e viabilizam o dimensionamento de projetos de irrigação por superfície de forma mais consistente.

O objetivo principal é o de simular a fase mais crítica do processo de irrigação, fase de avanço, com o auxílio de recursos computacionais. Obviamente, a equação de avanço obtida, com a respectiva vazão adotada, que maximiza eficiência de

aplicação e de armazenamento, deve ser verificada no campo.

É de fundamental importância que os dados obtidos no campo sejam os mais precisos possíveis, como a equação de infiltração e a equação que define a geometria do sulco. Contudo, a determinação do coeficiente de rugosidade hidráulica de Manning requer o bom senso do projetista.

Enfim, a utilização de recursos computacionais é uma alternativa racional de economia de tempo e de dinheiro, e de tornar a irrigação por superfície, quando possível, com níveis de eficiência competitivos quanto aos outros sistemas de irrigação.

BIBLIOGRAFIA

- (1) MARQUES JR., M. A. Curso de Computação. Piracicaba, Programe Computação S/C Ltda, 1986.
- (2) SCALOPPI, E. J. Sistemas de irrigação por superfície. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, 12 (139) julho de 1986.
- (3) SCALOPPI, E. J. Notas de aula: Irrigação I: de superfície e subterrânea. Curso de pós-graduação em irrigação e drenagem. Piracicaba, ESALQ/USP, 1986.
- (4) VIEIRA, M. Curso BASIC para microcomputadores. Viçosa, Departamento de Matemática da UFRV, 1984.

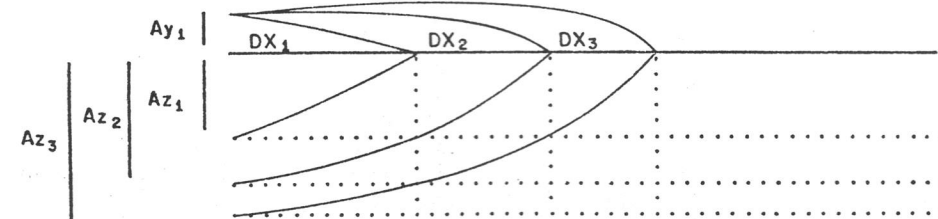


FIGURA 03