

**PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE****Márcio Antônio Vilas Boas**

*UNIOESTE - Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Departamento Engenharia - Cx. Postal 711  
Fone: (045) 225-2100 (R-249) - Fax: (045) 223-4584  
CEP: 85814-110 - Cascavel - PR - Brasil*

**1 RESUMO**

Os modelos matemáticos propostos para simular o processo de irrigação por superfície constituem recursos valiosos, capazes de incluir inúmeras alternativas de dimensionamento, a um custo e tempo reduzidos. O objetivo do presente trabalho resumiu-se no desenvolvimento de um programa computacional para simular todas as fases do processo de irrigação por superfície, utilizando a aproximação Zero-inércia das equações de Saint-Venant. A linguagem de programação utilizada foi Visual Basic, em ambiente Windows 95. Para proceder à avaliação do modelo utilizou-se dados de irrigação em sulco e faixa obtidos em campos experimentais de precisão. Os resultados mostraram-se plenamente satisfatórios para a simulação de todas as fases da irrigação. O programa computacional desenvolvido pode ser útil também como instrumento didático.

**UNITERMOS:** irrigação, irrigação por sulcos, simulação computacional.

**VILAS BOAS, M. A. . SOFTWARE FOR SIMULATION OF THE SURFACE IRRIGATION****2 ABSTRACT**

The use of mathematical models to predict surface irrigation process may be a valuable tool which allows several design alternatives, at reduced cost and time. The aim of this work is to develop a software to simulate all phases of surface irrigation, under the Zero-inertia approach, using a complete equations to describe surface flow. The computer program was developed in Visual Basic in Windows 95 environment. The model performance was evaluated by comparison with a precision furrow and border irrigation data. The results of both approaches were in good agreement with field data. The program may be also a useful tool for teaching.

**KEYWORDS:** irrigation, surface irrigation furrow, computer simulation.

**3 INTRODUÇÃO**

A irrigação por superfície constitui a modalidade mais utilizada no mundo e no Brasil (Vieira, 1983). Do total de terras cultivadas no mundo, 1,46 bilhões de hectares, aproximadamente 16% são irrigadas, sendo que deste percentual 10% são irrigados por superfície e 6% por outros métodos. Nos EUA, 67% da área irrigada utilizam-se dos métodos de irrigação por superfície (Azevedo, 1990). Dados publicados indicam que havia no Brasil até 1990 dois milhões novecentos e sessenta e seis mil hectares irrigados sendo que 5% destes eram irrigados por sulcos, com área média por produtor de 3,2 hectares e 67% destes eram irrigados por inundação, com área média por produtor de 13,9 hectares (Manual, 1991).

No Brasil, o percentual da área por superfície é de 47,5% na região Sudeste, 61% na região Centro-Oeste e 95% na região Sul.

Na região Nordeste, o percentual alcança até 94% nos Estados do Maranhão, Piauí e Ceará (Azevedo, 1990).

As necessidades alimentares da população brasileira na virada do século deverão ser satisfeitas pelo aumento da produtividade, sinônimo de irrigação, visto que a área cultivada no país cresce a ritmo mais lento que o necessário (Manual, 1991).

As diversas modalidades de irrigação por superfície: sulcos, faixas, tabuleiros, bacias, etc., apresentam, ao contrário da irrigação por aspersão ou localizada, a característica básica de realizar a condução da água através da própria superfície do terreno.

Em geral, a irrigação por superfície conduz a valores de eficiência de aplicação menores que a irrigação por aspersão ou gotejamento. Todavia, quando bem dimensionada e bem manejada, pode permitir valores elevados de eficiência de aplicação que reduzem a diferença existente quando comparada com outros métodos de irrigação (Grassi, 1988).

Entre os fatores que contribuem para a baixa eficiência de aplicação no método de irrigação por sulcos destacam-se a diferença em tempo de oportunidade para infiltração ao longo do sulco, inerente ao próprio método de irrigação; a variabilidade espacial e temporal da infiltração; e o manejo inadequado da água de irrigação.

Em relação ao manejo da água, as perdas por percolação profunda e por escoamento superficial são de grande importância na irrigação por sulcos sendo necessário seu estudo para quantificação e controle.

Existem diferentes métodos de medição da velocidade de infiltração diretamente no campo, entretanto todos eles são trabalhosos e necessitam de várias repetições para se obterem resultados satisfatórios. Uma alternativa para resolver tal problema é a determinação das características de infiltração via simulação, utilizando modelos matemáticos.

Existem quatro grandes grupos de modelos disponíveis que permitem simular o escoamento da água sobre a superfície do solo: Hidrodinâmico, Zero-Inércia, Onda-Cinemática, e Balanço Volumétrico, em ordem decrescente de complexidade.

O modelo Hidrodinâmico é utilizado para solucionar as equações da continuidade e da quantidade de movimento (equação do momentum ou da energia), Equações 1 e 2, respectivamente, também conhecidas como equações de Saint-Venant, na sua forma completa (Chow, 1959; Scaloppi, 1983; Walker & Skogerboe, 1987).

$$A \frac{\partial v}{\partial x} + vB \frac{\partial y}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial Az}{\partial \tau} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_o - S_f + D_I \quad (2)$$

sendo que:

$$S_f = \frac{V^2}{C^2 R} \quad (3)$$

$$e \quad D_I = v \frac{\partial Az / \partial \tau}{2 A g} \quad (4)$$

Onde  $A$  representa a área da seção transversal de escoamento superficial,  $V = a$  velocidade média do fluxo, considerada positiva quando ocorre na direção convencional à jusante,  $x =$  distância ao longo do canal,  $B =$  largura da seção transversal de escoamento medida na superfície livre,  $Az =$  área da seção transversal infiltrada,  $g =$  aceleração da gravidade,  $S_o =$  gradiente de declive do canal,  $S_f =$  gradiente de declive da resistência hidráulica dada pela Equação 3, onde  $C =$  coeficiente de Chezy,  $R =$  raio hidráulico, e  $D_I =$  contribuição dinâmica da infiltração, aqui considerada um fluxo lateral saindo do canal, conforme Equação 4.

Vários trabalhos (Fangmeier & Strelkoff, 1979; Scaloppi, 1983; Izuno & Podmore, 1985; Clemmens, 1991; Oliveira, 1994; Andrade, 1994) têm sido desenvolvidos para utilizar os diversos modelos na simulação de irrigações, conhecendo-se os parâmetros geométricos da área, as características de infiltração no solo e a irrigação real necessária.

Sabendo da grande importância de simular as características de infiltração de água no solo e da dificuldade de se fazerem estas medições no campo, o presente trabalho teve como objetivo:

Simular as fases de avanço e recessão da irrigação por superfície por um processo computacional e comparar os resultados das simulações com medidas de campo.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O modelo zero-inércia, conforme citado anteriormente, baseia-se na solução das equações da continuidade e quantidade de movimento, sob a condição assumida de que os termos inerciais da equação da quantidade de movimento são desprezíveis. Assim as equações 1 e 2 podem ser reescritas como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Az}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = A(S_o - S_f) \quad (6)$$

Para proceder a solução dessas equações, pode-se construir um plano no qual as distâncias estão representadas no eixo das abscissas, e os tempos correspondentes, no eixo das ordenadas. Assim, é possível estabelecer uma seqüência de linhas de tempo separadas por incrementos de tempo  $\delta t$ , onde, a cada tempo, a solução é obtida em uma seqüência de nós,  $x_k$ , onde  $k$  é o índice de distância ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) que, efetivamente, constituem os acréscimos de distância de avanço da frente líquida em movimento, a cada tempo  $t_i$ , onde  $i$  é o índice de tempo ( $i = 1, 2, \dots$ ) de maneira que  $n = i + 1$  e, no limite direito do plano  $x - t$ ,  $k = n$ , (Figura 1).

A construção do plano  $x - t$  permite organizar as células computacionais no início e no final de cada incremento de tempo  $\delta t$ . Para maximizar a estabilidade numérica da solução linearizada, Strelkoff & Katapodes (1977) sugerem que a forma das células computacionais, tendo dimensões finitas no plano  $x - t$ , seja transformada para a forma oblíqua, durante a fase de avanço. Assim, no caso de uma célula definida pelo paralelogramo *JMLR* (Figura 1) deve-se considerar a deformação do elemento fluido considerado, conforme encontra-se esquematizado na (Figura 2).

Nessa condição, a região do fluxo limitada pelos nós  $x_{k-2}$  e  $x_{k-1}$  no tempo  $t_{i-1}$ , apresenta as áreas das seções transversais superficial e infiltrada iguais a  $A_j$  e  $A_{zj}$ , respectivamente, no seu limite esquerdo e,  $A_m$  e  $A_{zm}$ , respectivamente, no direito. Nesse tempo,  $t_{i-1}$ , a vazão  $Q_j$  flui para a célula e,  $Q_m$  flui da célula. Durante o intervalo  $\delta t$ , o limite esquerdo da célula é deslocado para  $x_{k-1}$  e, o direito, para  $x_k$ . Ao final do intervalo  $\delta t$ , no tempo  $t_i$ , as áreas superficial e infiltrada e a vazão passam a ser, respectivamente,  $A_\ell$ ,  $A_{z\ell}$  e  $Q_\ell$ , no limite esquerdo, e  $A_r$ ,  $A_{zr}$  e  $Q_r$ , no direito.

A deformação do elemento fluido durante a fase de avanço introduz algumas modificações na forma integrada das equações da continuidade e quantidade de movimento. Nessa condição, as equações determinantes do fluxo superficial são integradas em relação a um volume incremental de água que se move no espaço e no tempo, definindo um sistema de fluxo fluido conhecido como sendo do tipo Lagrangiano.

Duas particularidades ocorrem durante a fase de avanço. A primeira localiza-se na extremidade esquerda do plano  $x - t$ , na primeira célula computacional. Conforme pode ser observado na (Figura 1), nessa célula, na linha de tempo conhecida, os pontos *J* e *M* estão sobrepostos.

Com o decorrer do intervalo de tempo,  $\delta t$ , o limite esquerdo da célula permanece fixo, porém, o direito desloca-se para  $s = x_1$ .

A outra particularidade ocorre na última célula à direita do plano  $x - t$ , definida pelos limites  $k = n - 1$  e  $k = n$  (Figura 1). Nesta célula, a vazão e as lâminas superficial e infiltrada diminuem acentuadamente desde o seu limite esquerdo ( $k = n - 1$ ) até atingir o valor zero no seu limite direito ( $k = n$ ).

Em resumo, durante a fase de avanço, as duas equações determinantes do fluxo, aplicadas à qualquer célula computacional intermediária *jmlr* apresentam quatro incógnitas, a saber,  $y_\ell$ ,  $Q_\ell$ ,  $y_r$  e  $Q_r$ . Isto porque todas as variáveis na linha de tempo precedente são conhecidas (Figura 1).

Aplicando-se o mesmo raciocínio para todas as células definidas entre  $t_{i-1}$  e  $t_i$ , pode-se concluir que cada célula acrescenta duas novas equações com duas incógnitas ao sistema computacional. Identificando-se por  $n$ , o número de pontos correspondentes aos sucessivos acréscimos de distância de avanço, a um determinado tempo ( $t_i$ ), um total de  $n - 1$  células computacionais estarão definidas nesta linha de tempo, apresentando  $2n - 2$  equações. Uma vez que no limite esquerdo da primeira célula  $Q_\ell$  é conhecido (vazão derivada à parcela) e, no limite direito da última célula,  $y_r$  e  $Q_r$  são nulos, mas  $\delta x_i$  é desconhecido, o número total de incógnitas será equivalente ao número total de equações, ou seja,  $2n - 2$ .

A partir do momento em que a distância de avanço seja equivalente ao comprimento da parcela considerado, inicia-se a fase de infiltração, com o surgimento de uma vazão positiva no limite direito do plano  $x - t$ , correspondente ao ponto  $x = n$ . Em condições de drenagem livre, essa vazão representa o deflúvio superficial no final da parcela e o fluxo observado no comprimento considerado assume características aproximadamente estacionárias (Strelkoff & Katapodes, 1977), onde a variação do perfil superficial com o tempo processa-se lentamente (Wilke & Smerdon, 1969). Para se obter a máxima precisão em função do esquema de solução numérica utilizado, o sistema computacional é modificado para células retangulares. Também nesse caso, ocorre uma condição particular na última célula à direita do plano  $x - t$ , onde  $y_r$  e  $Q_r$  não sendo nulos, obviamente constituem incógnitas adicionais ao sistema de equações considerado.

Com o objetivo de possibilitar a solução numérica das equações, assume-se que o fluxo através do último ponto do sistema computacional ocorre sob a condição de regime uniforme, cuja superfície de escoamento apresenta uma declividade e uma rugosidade hidráulica idênticas às do comprimento da parcela considerada. Em consequência, a forma do perfil da lâmina líquida nessa última célula computacional pode ser aproximada por uma linha reta, permitindo que sejam aplicadas as mesmas equações utilizadas para as células retangulares intermediárias (Souza, 1981).

O sistema de  $2n - 2$  equações e  $2n - 2$  incógnitas pode ser resolvido empregando-se o método conhecido como "double-sweep". (Liggett & Cunge, 1975). Este método permite resolver um sistema de equações lineares algébricas, de maneira que uma célula computacional seja conectada apenas às células adjacentes e não, diretamente a todas as outras células. Maiores detalhes da aplicação do método "double-sweep" podem ser apreciados nos trabalhos de

Cunge & Wegner (1964) , Ligget & Cunge (1975), (Strelkoff (1970). Com base nas equações do modelo Zero-inércia, apresentadas nos itens anteriores, desenvolveu-se um programa computacional, denominado HISUPER Versão 1.0, que foi dividido em três módulos: Balanço, Zero-Inércia e Avaliação. A Figura 3 apresenta uma das Telas visuais do Programa HISUPER.

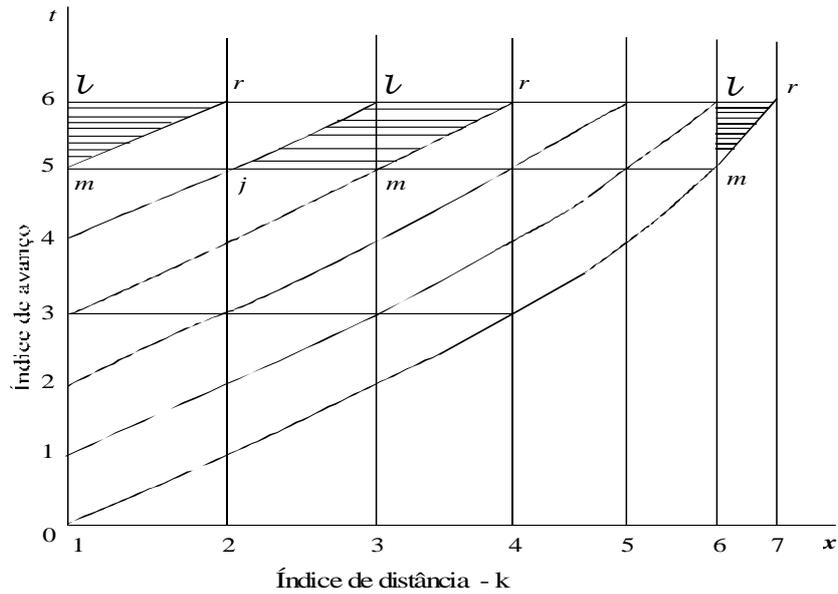


Figura 1 - Organização das células computacionais oblíquas no plano  $x - t$  durante a fase de avanço.

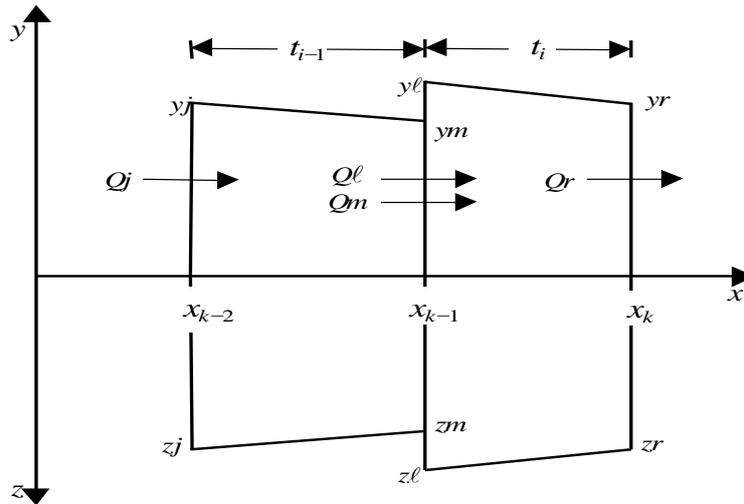


Figura 2 - Representação esquemática de uma célula computacional oblíqua no início e no final de um intervalo de tempo  $\delta t$ . Observar a correspondência com a célula oblíqua identificada na Figura 1.

Figura 3 - Tela de apresentação dos parâmetros de entrada para cálculo do avanço e da recessão pelo modelo Zero-Inércia.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para proceder a verificação do programa HISUPER, foram utilizados dados rigorosamente determinados em parcelas experimentais de precisão, pertencentes à Universidade do Arizona, em Tucson, E.U.A. e apresentados por Roth et al. (1974), Ramsey (1976), comprovados por Scaloppi, (1983). Segundo Scaloppi (1983), os modelos são apresentados de forma a permitir a avaliação de desempenho em sulcos ou faixas de infiltração. Sendo assim, o mesmo autor afirma que os sulcos podem ser considerados o caso geral.

Para considerar o caso geral, foram utilizados os dados referidos por Ramsey (1976), citados por Scaloppi (1983). As características principais do sulco e da irrigação ocorrida no trabalho, citado, estão anotadas nos Quadros 1.

Os parâmetros de sulcos de precisão relatados por Ramsey foram utilizados também por Souza (1981) para testar seu modelo hidrodinâmico e por Levien & Souza (1987) e Andrade (1994) na avaliação de modelos algébricos. Convém salientar que este conjunto de dados não traz nenhuma referência a respeito da velocidade de infiltração básica e das condições de umidade em que foram realizados os testes.

Os parâmetros originais de Ramsey(1976) são dados em pés, sendo necessária a devida transformação para metros para serem utilizados como entrada para o programa HISUPER. Para a comparação entre os resultados, os parâmetros foram transformados em uma equação de avanço, onde os tempos foram então calculados de 10 em 10m, até o final do sulco (100m). A Figura 4 apresenta as curvas de avanço calculadas pelo programa HISUPER e as observadas por Ramsey (1976).

Quadro 1 - Dados característicos de um evento de irrigação segundo Ramsey (1976).

Parâmetros	Símbolo	Irrigação F-2
Vazão	Qo	1,35 l/s
Tempo de Irrigação	Ti	208 min
Comprimento sulco	L	100,6 m
Espaçamento do Sulco	E	1,0 m
Declividade percentual	So	0,1032 (%)
Rugosidade	n	0,022
Parâmetros geométricos	c	1,095 m/m <sup>a</sup>
	m	0,4539
Coef. Equação Kostiakov	k	0,011 m/min <sup>a</sup>
	a	0,41
Delta t	δt	2 min

Como se pode verificar, o programa fornece uma excelente aproximação quando comparado com os dados de campo. O teste de Qui-quadrado foi utilizado para verificar a aderência dos dados obtidos pelo programa HISUPER em relação aos dados de Ramsey.

Os dados de avanço observados no campo quando comparados aos dados de avanço simulados pelo programa, apresentaram um valor calculado de  $\lambda^2 = 0,14$  e o valor crítico de  $\lambda^2_{0,95}$  é 16,9 para 9 graus de liberdade. Como o valor calculado é menor do que o valor crítico, pode-se afirmar que existe uma aderência entre os dados de avanço simulados e os observados no campo, em nível de 5% de probabilidade.

Como se pode verificar o programa fornece uma excelente aproximação para o avanço da água no sulco quando comparado com os dados de avanço no campo. Os valores calculados pelo programa proposto diferem daqueles observados no campo em 4% ao final do tempo de avanço, praticamente coincidindo com o valor observado, qualificando o programa como de grande precisão para a simulação da fase de avanço.

Os dados de recesso observados e aqueles simulados pelo programa HISUPER estão graficamente apresentados também na Figura 4. Os dados de recesso observados no campo quando comparados aos dados de recesso simulados pelo programa HISUPER, apresentaram um valor calculado de  $\lambda^2 = 0,98$  e o valor crítico de  $\lambda^2_{0,95}$  é 16,9 para 9 graus de liberdade. Como o valor calculado aqui também foi menor do que o valor crítico, pode-se afirmar que existe uma boa aderência entre os dados de recesso simulados e os observados no campo, em nível de 5% de probabilidade. Segundo Scaloppi (1983), a maior variabilidade entre os valores observados e os simulados na fase de recesso, relativamente à fase de avanço, determina um efeito pouco significativo no perfil longitudinal final de água infiltrada. Isso porque os acréscimos na quantidade de água infiltrada nesta fase derradeira de irrigação são reduzidos, tanto devido ao tempo relativamente longo de manifestação do processo de infiltração, como à redução do perímetro molhado, que determina a área de infiltração.

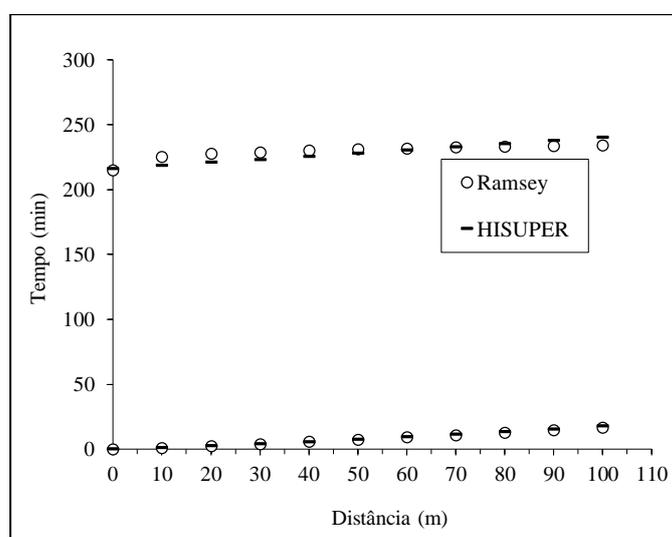


Figura 4 - Dados de avanço e recesso observados por Ramsey (1976) e calculados pelo programa HISUPER.

Neste trabalho também se utilizou-se de faixa de infiltração, para comparação aos dados simulados, sendo os dados utilizados em uma irrigação identificada pelo número 09, relatados no trabalho de Roth et al. (1974) citados por Scaloppi (1983), cuja as principais características estão apresentadas no Quadro 2.

Para facilitar a análise comparativa entre os dados de avanço observados e aqueles computados pelo programa HISUPER procedeu-se a um teste de aderência de  $\lambda^2$ . Os dados de avanço para faixa observados no campo quando comparados aos dados de avanço simulados pelo programa, apresentaram um valor calculado de  $\lambda^2 = 1,11$  e o valor crítico de  $\lambda^2_{0,95}$  é 16,9 para 9 graus de liberdade, sendo verificado as mesmas aderências em faixas. Apresentando assim uma boa aproximação para avanço em faixas o programa HISUPER (Figura 5).

Também comparou-se o desempenho do programa HISUPER em simular a fase de recesso em faixas de irrigação, usando os dados observados por Roth et al. (1974).

Os resultados obtidos pelo programa HISUPER foram muito semelhantes aos resultados encontrados para o caso de sulco de irrigação. Nota-se aqui também, uma certa variação entre a regularidade do deslocamento gradativo da frente recessiva, revelada pela simulação, e os dados observados por Roth et al. (1974).

Segundo Scaloppi (1983) a importância relativa das discrepâncias entre os resultados observados e os simulados durante a fase de recesso, é pouco significativa, em virtude da redução da razão de infiltração durante esta fase final do processo de irrigação. Assim, ainda segundo o autor, o perfil longitudinal de água infiltrada deverá ser pouco afetado pelas pequenas variações eventualmente observadas entre as curvas de recesso apresentadas. No Quadro 3, são apresentados o resultado dos parâmetros de desempenho quando da avaliação e redimensionamento de um evento de irrigação por sulcos (Ramsey, 1976), Quadro 1.

Quadro 2 - Dados característicos de um evento de irrigação por Faixas segundo Roth et al. (1974) citados por Scaloppi (1983).

Parâmetros	Símbolo	Irrigação F-2
Vazão	Qo	14,2 l/s
Tempo de Irrigação	Ti	179,7 min
Comprimento sulco	L	91,44 m

Espaçamento do Sulco	E	-
Declividade percentual	So	0,1 (%)
Rugosidade	n	0,035
Parâmetros geométricos	c	5,89 m/m <sup>a</sup>
	m	0
Coef. Equação Kostiakov	k	0,01524 m/min <sup>a</sup>
	a	0,336
Delta t	δt	4 min

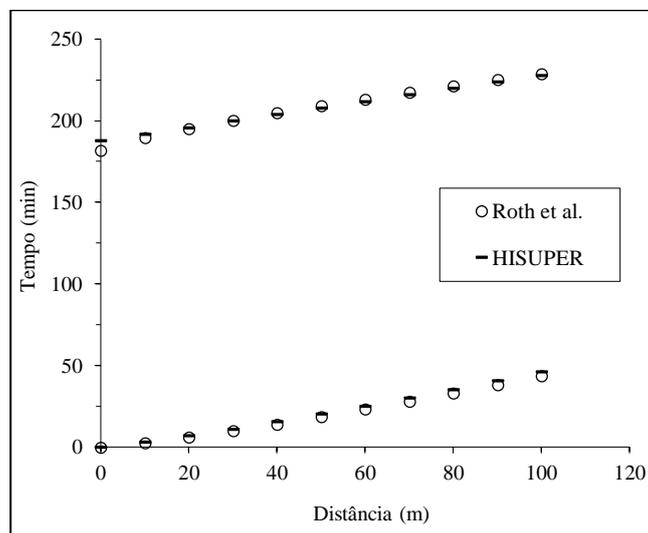


Figura 5 - Dados de avanço e recessão observados por Roth et al. (1974) e pelo programa HISUPER.

Observa-se que o evento apresenta uma eficiência de aplicação de 27,9%, uma eficiência de armazenamento de 100%, uma perda por percolação de 28,2% e perda por escoamento de 43,9%. Neste caso sugere-se que deva ser alterado o tempo de irrigação, pois a perda por escoamento está bastante elevada. Mantendo-se a mesma vazão de 1,35l/s e diminuindo-se o tempo de irrigação  $T_i$  para 70min, obteve-se a máxima eficiência de aplicação ( $E_a = 73,2$ ), assumindo-se que as características de infiltração mantiveram-se constantes, Quadro 3.

Quadro 3 - Valores dos parâmetros de desempenho determinados pelo módulo avaliação, para um evento de irrigação por sulcos (Ramsey, 1976) e lâmina de 50mm.

	$T_i$ (min)	$Q_o$ (l/s)	$E_a$ (%)	$P_e$ (%)	$P_p$ (%)	$E_r$ (%)
<b>Avaliação</b>	208	1,35	27,9	43,9	28,2	100
<b>Redimens.</b>	70	1,35	73,2	1,9	25,0	100

## 6 CONCLUSÕES

Com base, nos resultados obtidos, na metodologia usada e nas condições dos ensaios de comparação de campo, chegou-se às seguintes conclusões:

- os valores calculados pelo programa HISUPER praticamente igualaram-se com aqueles observados nos ensaios de campo para a fase de avanço e recessão para sulcos.
- o mesmo ocorreu para faixas de irrigação.
- com relação ao desenvolvimento do programa HISUPER, o mesmo se mostra bem simplificado, útil e didático quando comparado aos programas desenvolvidos a nível de Brasil.
- o programa HISUPER oferece boas alternativas de simulação dos parâmetros de desempenho.
- como sugestão, o programa deveria ser testado com diferentes tipos de solo, em parcelas mais uniformes em termos de nivelamento e também com outras metodologias de cálculos das constantes da equação de infiltração, que constituem os parâmetros de entrada mais importantes para se avaliar com segurança o programa HISUPER.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, D. V. *Modelo matemático para simulação da fase de avanço na irrigação por sulcos*. Piracicaba, 1994. 135p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- AZEVEDO, M. A. S. B. et al. *Características de avanço e infiltração de água em sulcos para os escoamentos contínuos e intermitente*. Brasília: ITEM, 1990. p.26-31.
- CHOW, V. T. *Open channel hydraulics*. New York: McGraw Hill, 1959. 128p.
- CLEMMENS, A. J. Direct solution to surface irrigation advance inverse problem. *J. Irrig. Drain Div.*, v. 117, n.4, p.578-94, 1991.
- CUNGE, J. A., WEGNER, M. Intégration numérique des équations d'écoulement de Barré de Saint-Venant par un schéma implicite de différences finies. *La Houille Blanche*, v.19, n.1, p.33-9, 1964.
- ELLIOT, R. L., WALKER, W. R., SKOGERBOE, G. V. Furrow irrigation advance rates: a dimensionless approach. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.26, n.6, p.1722-25, 1983.
- FANGMEIR, D. D., STRELKOFF, T. Mathematical models and border irrigation design. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.22, p.93-9, 1979.
- GRASSI, G. J. *Diseño y operation del riego por superficie*. Mérida: CIDIAT, 1988. 415p. (RD, 36).
- IZUNO, F. T., PODMORE, T. H. Kinematic wave model for surge irrigation research in furrows. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.28, p.1145-50, 1985.
- LEVIEN, S. L. A., SOUZA, F. Algebraic computation of flow in furrow irrigation. *J. Irrig. Drainage Eng.* v.113, p.367-77, 1987.
- LIGGET, J. A., CUNGE, J. A. Numerical methods of solution of the unsteady flow equations. In: MAHMOOD, K., YEVEJEVIVH, V. (Ed). *Unsteady flow in open channels*. Fort Collins: Water Resources, 1975. v.1, p.89-182.
- MANUAL de irrigação. São Paulo: Abril, 1991. 170p.
- OLIVEIRA, J. L. B. *Modelo computacional, para determinação dos parâmetros da infiltração de água no solo, utilizando o princípio de zero-inércia*. Viçosa, 1994. 83p. Tese (Doutorado Engenharia Agrícola/Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Viçosa.
- RAMSEY, M. K. *Intake characteristics and flow resistance in irrigation furrows*. Tucson, Arizona, 1976. 141p. [Thesis \(University of Arizona\)](#).
- ROTH, R.L. et al. Data for border irrigation models. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v. 17, 157-161, 1974.
- SCALOPPI, E. J. *Modelos matemáticos para simulação da irrigação superficial*. Botucatu, 1983. 155p. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista.
- SOUZA, F. *Nonlinear hydrodynamic model of furrow irrigation*. Davis, 1981. 172p. Dissertation (Ph.D.) - University of California.
- STRELKOFF, T. Numerical solution of the Saint-Venant equations. *J. Hydr. Div., Proc. Am. Soc. Civil Engr.*, v.96,n.1, p.223-52, 1970.
- STRELKOFF, T., KATAPODES, N. D. Border Irrigation hydraulics with Zero-Inertia. *J. Irrig. Drainage Division*, v.103, p.325-42, 1977.
- VIEIRA, J. Irrigação de Superfície. *Inf. Agropecu.*, n.100, p.13-23, 1983.
- WALKER, W. R., SKOGERBOE, G. V. *Surface irrigation: theory and practice*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987. 386p.
- WILKE, O. C., SMERDON, E. T. A hydrodynamic determination of cutback stream sizes for irrigation furrows. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.12, p.634-7, 1969.