

# PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA SIMULAR A OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA DE UMA EXPLORAÇÃO AGRÍCOLA UTILIZANDO MODELOS DE IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE: SPL (Parte I: programa computacional)

Harold Tafur Hermann.<sup>1</sup> - Antonio Alves Soares.<sup>2</sup>  
Braulio Goncalves Leal<sup>3</sup>

## RESUMO

Para simular a produção e lucro, de qualquer cultura irrigada com irrigação por superfície, foi desenvolvido um programa computacional: o SPL. Na elaboração do programa foram considerados quatro (4) módulos. O módulo principal simula o balanço hídrico do solo, utilizando informação do solo, clima e da cultura. Um segundo módulo simula os parâmetros da equação de infiltração de Kostiakov-Lewis, aplicando o modelo zero inércia com dados de campo do avanço da água na área e parâmetros hidráulicos da superfície de escoamento. O terceiro módulo simula os eventos da irrigação, utilizando o modelo de onda cinemática e essencialmente informação de vazão, porcentagem da irrigação real necessária aplicada no final da área e infiltração. Finalmente, o quarto módulo simula a produção e a receita líquida da exploração, utilizando a função de produção e informação sobre custos e valor do produto.

**Palabras claves:** Programa computacional, irrigação por superfície, zero-inercia, onda cinemática, otimização econômica

## ABSTRACT

### COMPUTER PROGRAM TO SIMULATE ECONOMIC OPTIMIZATION FOR ANY CROP USING MODELS FOR SURFACE IRRIGATION : SPL (PART I : COMPUTER PROGRAM)

A computer programa (SPL) was developed to simulate yield and profite for any crop under surface irrigation. Four parts were considered in the program. The main part simulates the water balance of the soil using data from the soil, the weather and the crop. The second part simulates the parameters of the Kostiakov-Lewis infiltration equation. The section applies the zero-inertia model with field data for water advance en the hydraulic parameters for the flow surface. The third part simulates the event using the kinematic wave model with data from the flow rate and a percentage of he applied soil moisture deficit (SMD) at the end of the flow surface. Finally, the fourth part simulates the yield and the net profite using the yield function of the crop and the information about commercial price of the product.

**Key word:** Computer program, furrow irrigation, zero. Inertial, kinematic-wave, economic optimization

## INTRODUÇÃO

Os sistemas de irrigação por superfície geralmente apresentam baixa eficiência do uso de água devido ao manejo e ao dimensionamento inadequados. Porém, com o aparecimento dos modelos para a simulação da hidráulica da irrigação por superfície, surgiu a possibilidade de dimensionar e manejar corretamente os sistemas sem necessidade de testes exaustivos de campo, que demandam tempo e dinheiro, e ainda possibilitando a melhoria da eficiência. Esses modelos simulam o avanço e a recessão da água ao longo da superfície do solo, o volume de água infiltrado ao longo da área, o volume escoado e o volume percolado para

cada vazão de entrada e tempo de irrigação utilizados (STRELKOFF e KATOPODES 1977; WALKER e HUMPHERYS, 1983). Conhecendo-se a lâmina de água infiltrada ao longo da área e a função de produção da cultura, pode-se estimar a produtividade da cultura (WALLENDER e RAYEJ, 1987). De modo geral, espera-se que com o aumento da lâmina de água aplicada tenha-se um aumento na produtividade da cultura, mas, por outro lado, tenha-se também, um aumento no custo do sistema. Portanto, deve haver uma combinação das variáveis vazão e tempo de irrigação que maximize o retorno econômico do sistema (REDDY e CLYMA, 1981).

<sup>1</sup> Professor Asociado Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira; <sup>2</sup> Professor Titular Departamento de Engenharia Agrícola UFV, Brasil; <sup>3</sup> Professor Universidade do Vale M.G., Brasil.



Visando ajudar na solução dos problemas mencionados, neste trabalho objetivou-se elaborar um programa computacional que permite-se manejar e dimensionar sistemas de irrigação por superfície baseados no critério de máximo retorno econômico ou lucro.

## MATERIAL E METODOS

Na elaboração do programa computacional foram considerados quatro (4) módulos. O módulo principal simula o balanço hídrico do solo, utilizando informação do solo, clima e da cultura. Um segundo módulo simula os parâmetros da equação de infiltração de Kostiakov-Lewis, aplicando o modelo zero inércia com dados de campo do avanço da água na área e parâmetros hidráulicos da superfície de escoamento. O terceiro módulo simula os eventos da irrigação, utilizando o modelo de onda cinemática e essencialmente informação de vazão, porcentagem da irrigação real necessária (IRN) aplicada no final da área e infiltração. No último módulo é simulada a produção e a receita líquida da exploração (TAFUR, 1999).

Para simular o balanço hídrico do solo foi seguido um procedimento utilizado por COSTA et al. (1997) e MOTTA e OLIVEIRA (1987). Neste procedimento o balanço hídrico é feito por camada de solo, considerando  $n$  camadas, com  $n \leq 4$ . Dentro de cada camada é calculada a evapotranspiração, a precipitação efetiva e considerado o aporte de água pela irrigação. Assim, é possível estimar as mudanças no teor de umidade por camada. Além, o balanço é feito de forma individual e independente, em cada trecho gerado no avanço da água dentro do processo de irrigação, ao longo da área. A evapotranspiração real da cultura (ET), é calculada por camada de solo e por trecho do comprimento da área, como o produto da evapotranspiração de referencia ( $ET_0$ ) o coeficiente da cultura,  $K_c$  e um coeficiente adimensional que depende da umidade do solo,  $K_s$ . A evapotranspiração de referencia pode-se calcular dentro do modelo, com uma qualquer das formulas: Penman-Monteith, Hargreaves-Samani ou Tanque Classe A (com base na disponibilidade da informação climática). Os valores do coeficiente da cultura são dados de entrada no modelo.

O segundo módulo, utilizando o principio de zero inércia, simula os parâmetros da equação de Kostiakov-Lewis seguindo a metodologia proposta por OLIVEIRA (1994).

Um terceiro módulo simula os eventos da irrigação nas diferentes fases com base no modelo de onda cinemática, que por sua vez utiliza os parâmetros da

expressão funcional de Kostiakov-Lewis para a infiltração, informação de vazão e do porcentagem da irrigação real necessária (IRN), a aplicar no final da superfície de escoamento. Também é considerada neste módulo, uma correção por o perímetro molhado gerado pela utilização de vazões diferentes à utilizada na simulação dos parâmetros da infiltração (RAGHUWANSHI e WALLENDER, 1994), assim:

$$Z_c = Z \left( \frac{W_p^*}{W_p} \right) \quad (1)$$

ou

$$Z_c = Z \left[ \frac{Q_2}{Q_1} \right]^{\frac{10-3f}{2f}} \quad (2)$$

em que

- $Z_c$  = infiltração corrigida por perímetro molhado ou vazão;
- $Z$  = infiltração;
- $W_p$  = perímetro molhado durante a infiltração;
- $W_p^*$  = perímetro molhado durante a irrigação;
- $Q_2$  = vazão da irrigação;
- $Q_1$  = vazão da infiltração;
- $f$  = parâmetro empírico que depende da seção hidráulica da superfície de escoamento.

No último módulo é simulada a produção da cultura e é estabelecida a rentabilidade da exploração. Para simular a produção é utilizada uma função de produção que relaciona produção-evapotranspiração; para o efeito o modelo permite selecionar entre a expressão de STEWART et al (1977), e uma expressão polinômica simples.

Na simulação da análise econômica, o último módulo determina a receita líquida da exploração. Para o efeito, é simplesmente feita a diferencia entre os custos e os benefícios. Nos custos podem ser considerados custos fixos (valor da terra, preparação, insumos, etc.), e variáveis (custo da água essencialmente). Como benefício é considerado o valor comercial do produto.

## APRESENTAÇÃO DO MODELO

Na Figura 1 apresenta-se um fluxograma da seqüência operacional do programa computacional ou modelo. A apresenta-se também na figura 2 a tela principal do modelo "Simulação de Produção e Lucro Financeiro,

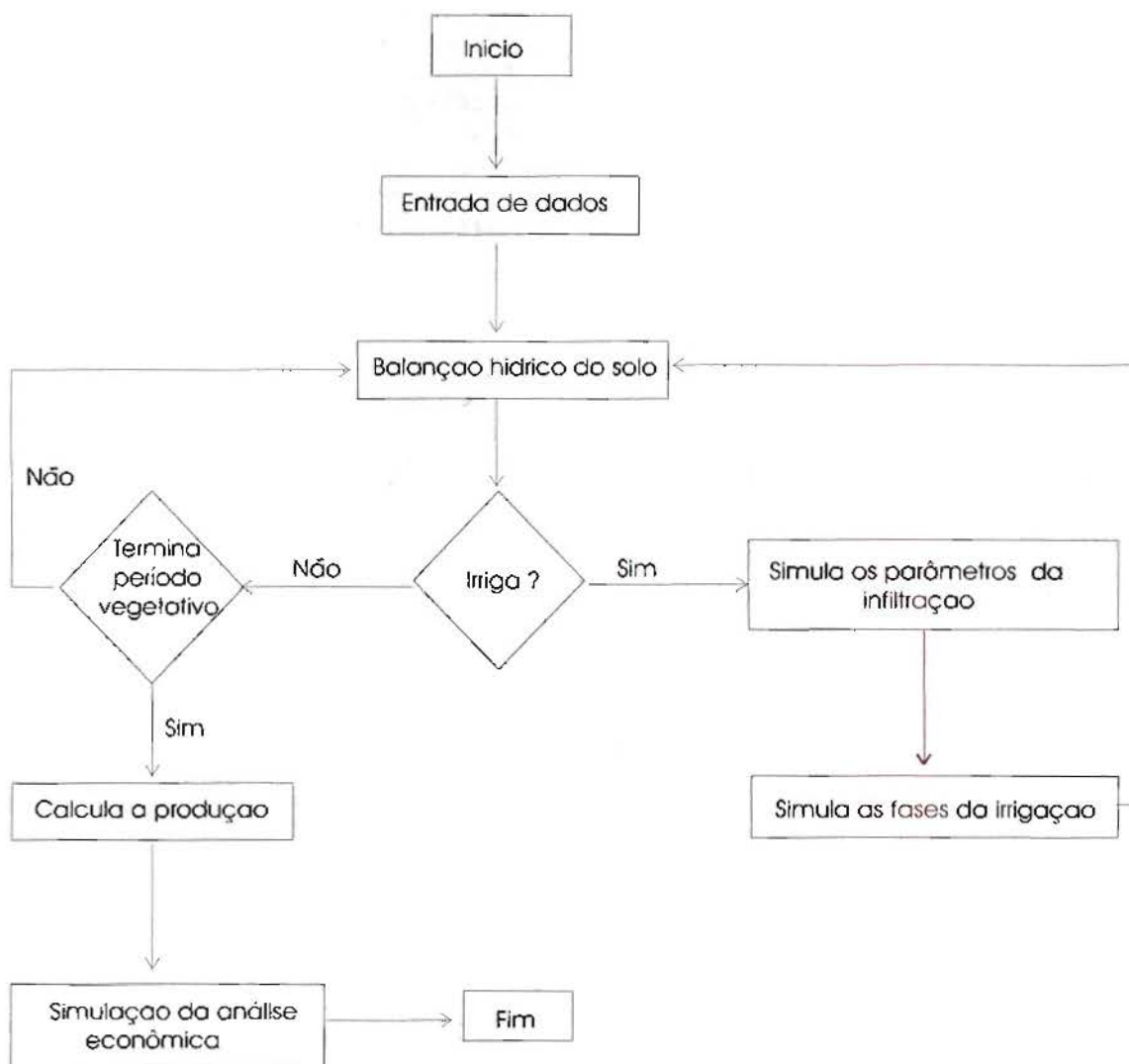


FIGURA 1. Fluxograma da seqüência operacional do programa computacional

SPL”, com as opções: configurar, calcular e ajuda. Na opção configurar o usuário vai alimentar o sistema com as informações necessárias ao modelo. Após configurar o sistema, podem ser implementado os cálculos, e o usuário passa a ter acesso aos diversos resultados (TAFUR, 1999).

#### Configuração

A configuração geral dos dados de entrada para o projeto é apresentada na Figura 3. Observa-se que os dados de entrada foram divididos em informações

gerais: cultura, solo, estação meteorológica, clima, função de produção e hidráulica de irrigação por superfície.

#### Informações gerais do projeto

Como informações gerais (figura 3), tem-se: localização do projeto; cultura; nome do solo; nome da estação climática mais próxima; método de cálculo da duração dos estádios da cultura que pode ser em dias ou graus-dias; método para cálculo da evapotranspiração de referência, onde o usuário pode escolher



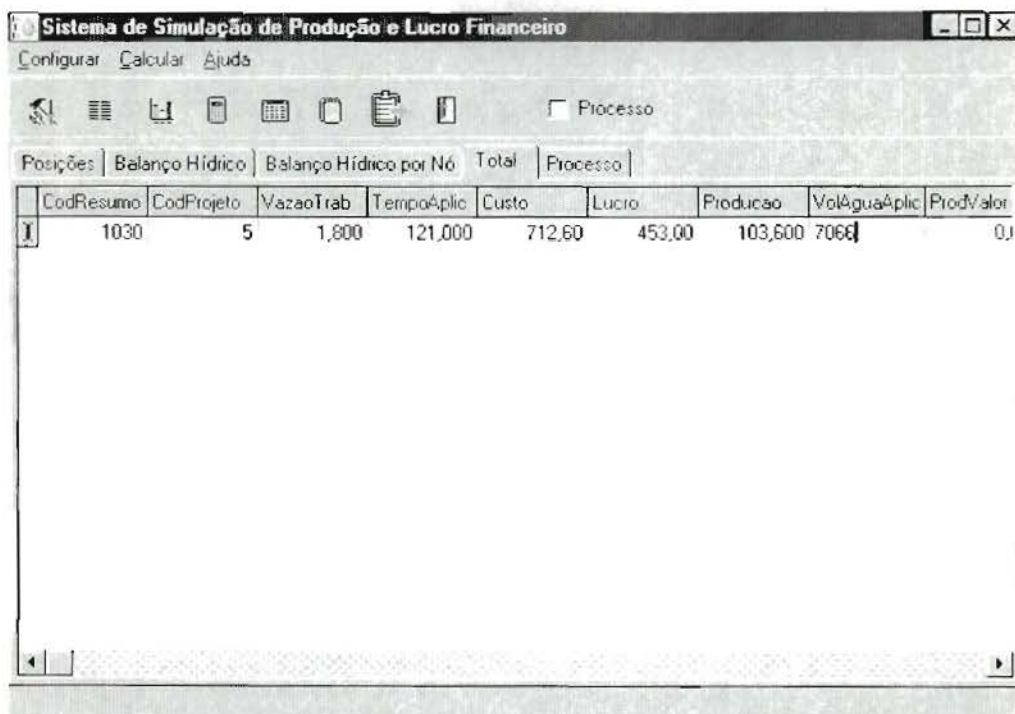


FIGURA 2. Caixa de diálogo apresentando a tela principal do modelo

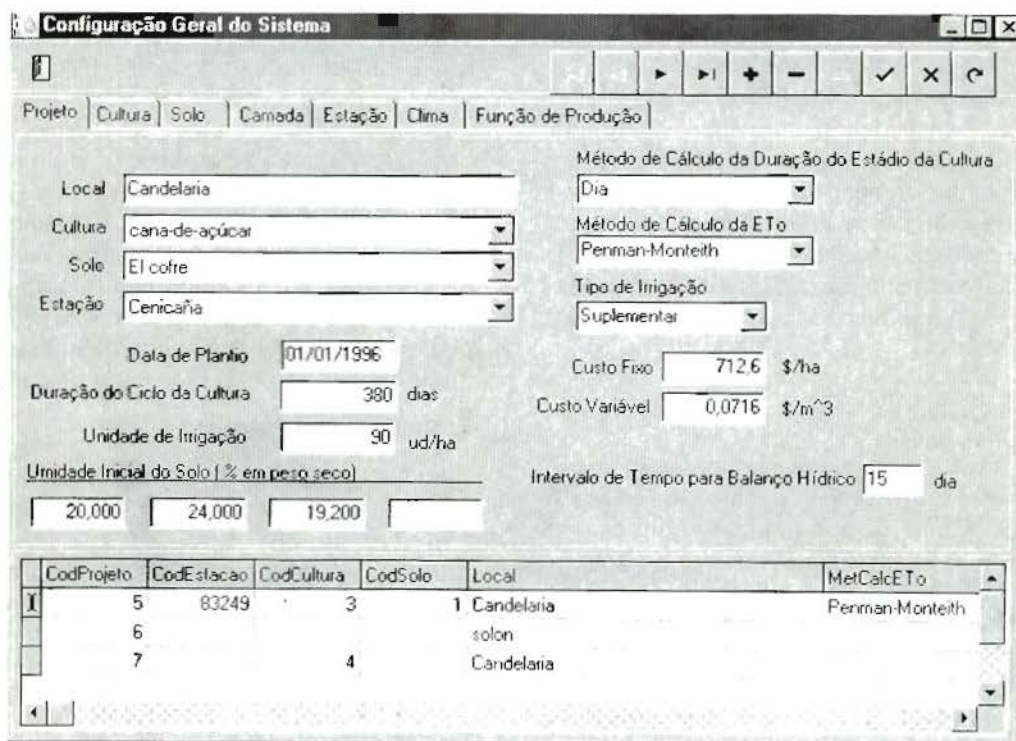


FIGURA 3. Caixa de diálogo para a informação do projeto

Nome: cana-de-açúcar

Fator de esgotamento da água do solo: 0,500

Temperatura Basal: 10,000

Produção Máxima: 150000 kg/ha

Preço do Produto: 0,016129 \$/kg

Estádio	Kc	Duração (dia)	Duração (graus dias)	Profundidade Radicular (m)
Início	0,200	95,000	98,000	0,350
Desenvolvimento	0,800	105,000	125,000	0,500
Intermediário	1,000	110,000	160,000	0,600
Final	0,800	40,000	160,000	0,600
Colheita	0,600	30,000	90	0,600

CodCultura	Nome	P	KcIni	KcDes	KcInt	KcFin
1	milho	0,500	0,300	0,800	1,100	
3	cana-de-açúcar	0,500	0,200	0,800	1,000	
4	feijão	0,500				

FIGURA 4. Caixa de diálogo correspondente à informação da cultura

entre Penman-Monteith, Hargreaves-Samani ou Tanque classe A; tipo de irrigação, que pode ser total, suplementar ou sem irrigação; custo fixo da exploração (\$/há); custo variável com o insumo água, (\$/m<sup>3</sup>); intervalo de tempo a considerar para o balanço hídrico (dias); data de plantio; duração do ciclo da cultura (dias); unidades de irrigação por hectare (número de sulcos ou faixas/ha); umidade inicial do solo por camadas (% em peso seco). Nesta tela são apresentados também os projetos cujos bancos de dados já foram criados pelo modelo.

#### Dados da cultura

Ao selecionar cultura na tela de configuração do sistema, o usuário tem acesso à caixa de diálogo apresentada na Figura 4, onde ele deve fornecer: o nome da cultura; o fator de esgotamento do solo ou fator de disponibilidade de água no solo; a temperatura basal da cultura (°C) que é utilizada na simulação da duração do ciclo da cultura; a produtividade máxima da cultura (kg/ha), o preço do produto (\$/kg); os valores do coeficiente da cultura nos diferentes estádios de desenvolvimento (Kc); duração de cada um dos estádios (dias); duração de cada um dos estádios (graus-dias); profundidade radicular em cada

estádio. No final da tela tem-se a listagem das culturas já cadastradas no modelo.

#### Dados do solo

As informações referentes ao solo são solicitadas em duas caixas de diálogo. Na primeira (Figura 5) tem-se: nome, velocidade de infiltração básica e o histórico do solo. É apresentado também a listagem dos solos cadastrados. Na segunda tela (Figura 6), solicita-se, camada, a profundidade final do solo (m), a capacidade de campo (% em peso seco), o ponto de murcha permanente (% em peso seco), e a densidade do solo

#### Estação meteorológica

As informações referentes à estação meteorológica são solicitadas na caixa de diálogo apresentada na Figura 7, as quais são: nome da estação, latitude (graus); altitude em relação ao nível do mar (m), altura de instalação do anemômetro que está gerando os dados de velocidade do vento, e bordadura do tanque classe A. A lista das estações já cadastradas também é apresentada.

#### Dados climáticos

Na tela apresentada na Figura 8 são solicitados os nome da estação climática, os dados diários de tem-

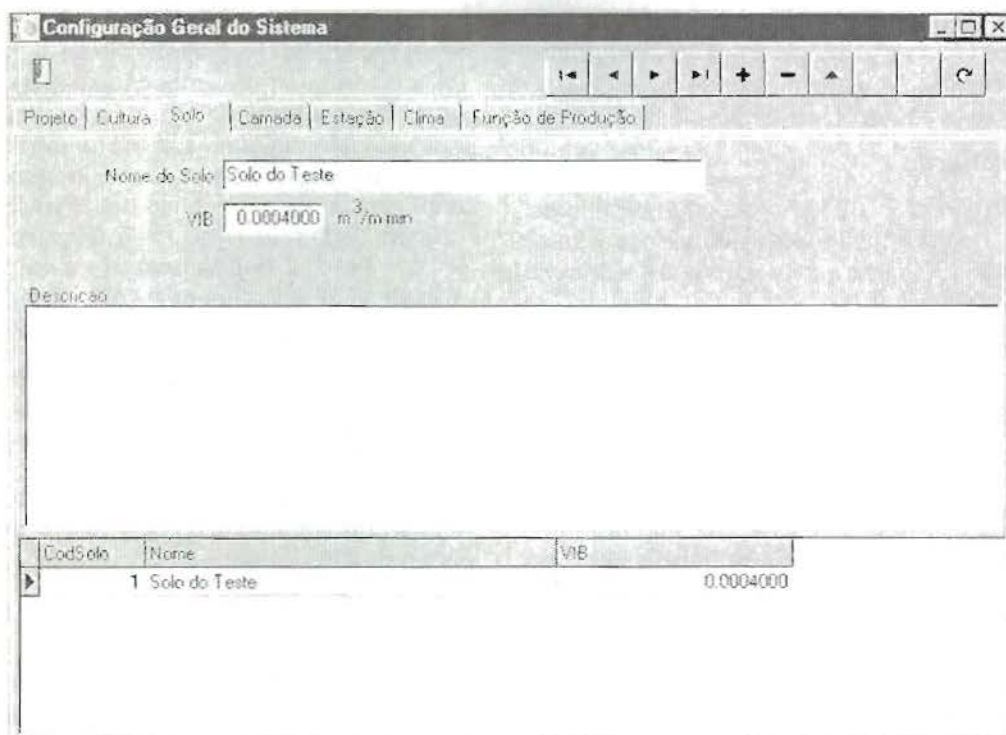


FIGURA 5. Caixa de diálogo com a informação de velocidade de infiltração básica

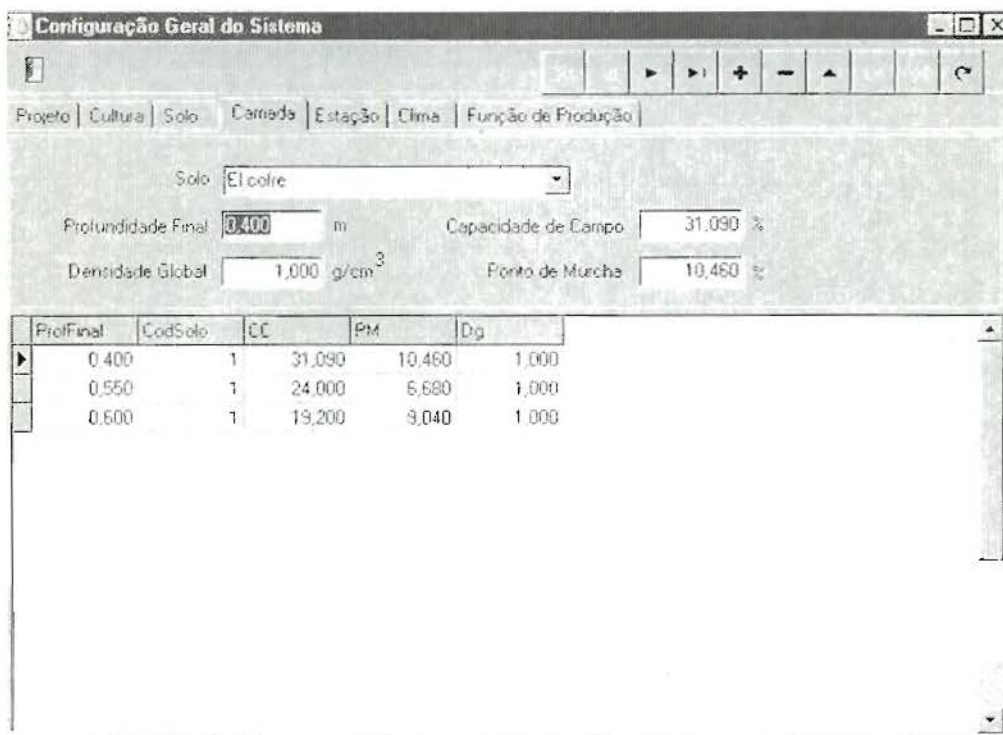


FIGURA 6 . Caixa de diálogo apresentando os dados do solo por camadas



peratura máxima ( $T_x$ ), temperatura mínima ( $T_n$ ) e temperatura média ( $T$ ), em graus celsius; umidade relativa (%); insolação (horas/dia); velocidade do vento (m/s); precipitação e evaporação do tanque classe A (mm).

### Função de produção

Os parâmetros da função de produção da cultura, podendo ser o modelo de Stewart ou o modelo polinomial, são solicitados na caixa de diálogo apresentada na Figura 9.

### Dados hidráulicos e do teste de avanço

Os dados referentes à hidráulica de irrigação por superfície são solicitados nas telas apresentadas nas Figuras 10 e 11, os quais são: comprimento do sulco ou faixa (m), vazão utilizada no teste de avanço ou no teste de infiltração (L/s), declividade da superfície do solo (%), coeficiente de rugosidade da equação de manning, espaçamento entre sulcos unidade de largura da faixa (m), parâmetros geométricos da superfície de escoamento ( $ro_1$ ,  $ro_2$ ,  $b$  e  $h$ ), fatores de ponderação em relação ao espaço e tempo ( $\phi$  e  $\theta$ ), valor do incremento de tempo na simulação ou medição do tempo de avanço ( $\delta T$ ), valor do incremento de tempo na simulação da fase de reposição

( $\delta T_{Rep}$ ), valor do incremento de tempo na fase de recessão ( $\delta T_{Rec}$ ), velocidade de infiltração básica, percentagem da irrigação real necessária a ser aplicada no final da área, porcentagem de área molhada mínima, para considerar terminada a fase de recessão, vazão de simulação, incremento de tempo para simular os parâmetros de infiltração ( $\delta T$ ), utilizando dados de avanço da água na superfície de escoamento, e dados teste de avanço da água na superfície de escoamento (TAFUR, 1999).

Os parâmetros "a" e "k" da equação de infiltração podem ser obtidos por meio de um teste de infiltração e fornecidos ao modelo ou simulados pelo próprio modelo utilizando os dados de um teste de avanço executado no campo. Observe que o usuário tem a opção de entrar com diferentes valores de "k", para refletir a variação das características de infiltração ao longo da área.

### Informações de saída

Quando o usuário utilizar o modelo para simular os parâmetros da equação de infiltração de Kostiakov-Lewis, a e k, ele terá os resultados apresentados na caixa de diálogo referente aos dados de entrada (Figura 10).

Estacao	Nome	LatG	LatM	LatS	Altitude	BordTCA
83249	Cenicaña	3	36	16	1000	

FIGURA 7. Caixa de diálogo da informação da estação meteorológica

**Configuração Geral do Sistema**

Projeto | Cultura | Solo | Camada | Estação | Clima | Função de Produção

Estação: Cenicaña | Umidade Relativa: 78,000 %  
 Data: 07/01/1996 | Velocidade do Vento: 1,800 m/s  
 Temperatura Mínima: 21,000 °C | Insolação: 6,900 h  
 Temperatura Máxima: 30,000 °C | Precipitação: 0,000 mm  
 Temperatura Média: 24,500 °C | Leitura do Tanque Classe A: 5,000 mm

Estacao	Data	Tx	T	Tn	Ur	Ins	Vv	Prec
1	01/01/1996	26,000	24,000	22,000	75,000	5,000	2,200	5,0
1	02/01/1996	26,000	25,000	24,000	72,000	7,000	1,800	0,0
1	03/01/1996	27,000	23,000	19,000	79,000	5,000	2,100	0,0
1	04/01/1996	30,000	25,000	22,000	78,000	5,500	2,400	0,0
1	05/01/1996	29,000	26,000	23,000	77,000	6,100	2,000	2,0
1	06/01/1996	32,000	26,000	20,000	78,000	5,200	2,100	0,0
1	07/01/1996	30,000	24,500	21,000	78,000	6,900	1,800	0,0
1	08/01/1996	33,000	24,500	24,000	74,600	5,400	1,900	0,0

FIGURA 8. Caixa de diálogo para a informação climatologia

**Configuração Geral do Sistema**

Projeto | Cultura | Solo | Camada | Estação | Clima | Função de Produção

Stewart  $Y = Y_{max} \{ 1 - \beta ( 1 - ET/ET_{max} ) \}$   
 Polinomial  $Y = a + b ET$

beta: 1,1

FIGURA 9. Caixa de diálogo para a função de produção



Configuração do Sistema de Irrigação

$A^2 R^{4/3} = r_01 \cdot A^{r_02}$        $y = b \cdot A^h$

Sulco/Faixa | Água

Comprimento 110 m      %Área 1 %      Delta<Mínimo 0.5 m

Vazão de Infiltração 1.33 L/s      100 % IRN

Declividade 1.1 %      VIB 0.0004 m<sup>3</sup>/min/m      k médio 0.0137

Rugosidade 0.03      b 2.6      k edK

Espaçamento 1 m      h 0.91

ro1 0.19      Dados de Avanço

ro2 2.68      DeltaT 10 minutos

fi 0.51

teta 0.6

a 0.1550000

5 minutos

DeltaTRec 1 minutos

DeltaTRep 1 minutos

Tempo (min)	Distancia (m)	k
10	23	0.0137
20	42	0.0137
30	66	0.0137
40	81	0.0137
50	90	0.0137
60	110	0.0137
70		
80		

FIGURA 10 Caixa de diálogo para definir os parâmetros da infiltração e irrigação

O usuário terá acesso aos demais dados de saída nas caixas de diálogo apresentadas nas Figuras 12 e 13.

### Irrigações

Resultados referentes as irrigações simuladas durante o ciclo da cultura são apresentados na caixa de diálogo da Figura 12. Para cada ponto ao longo do sulco ou faixa são apresentados os dados de tempo de avanço, tempo de recessão, tempo de oportunidade, infiltração acumulada para cada irrigação simulada e os valores do coeficiente "k" da equação de infiltração.

### Balanco Hídrico por nó

Os resultados do balanço hídrico em cada ponto ou nó ao longo do sulco ou faixa é apresentado na tela da Figura 13. São apresentados código do projeto,

número do nó, data da irrigação, tempo de aplicação, vazão utilizada, evapotranspiração da cultura, infiltração acumulada, a irrigação real necessária, coeficiente do solo  $K_s$ , precipitação, umidade do solo por camada, evapotranspiração da cultura e a máxima acumuladas, produtividade e o número de irrigações (TAFUR, 1999).

### Total

Na opção total é apresentado um resumo dos resultados de vazão (l/s), tempo de aplicação (min), custo total (\$/ha), produtividade (kg/ha), receita ou lucro (\$/ha) número de irrigações, eficiências de aplicação e armazenamento (%), coeficiente de uniformidade de Christiansen (%), volume total de água aplicado por hectare (m<sup>3</sup>), volume de água percolado (m<sup>3</sup>/ha) e volume de água infiltrado (m<sup>3</sup>/ha) (Figura 2).

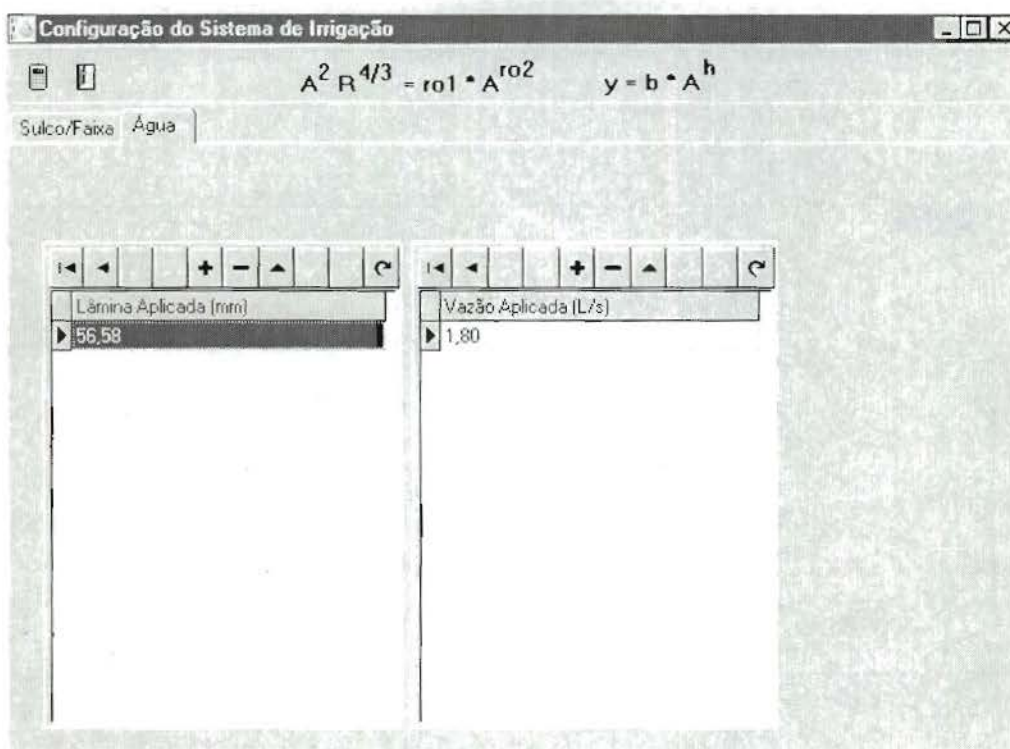


FIGURA 11. Caixa de diálogo para definir a IRN e a vazão da irrigação

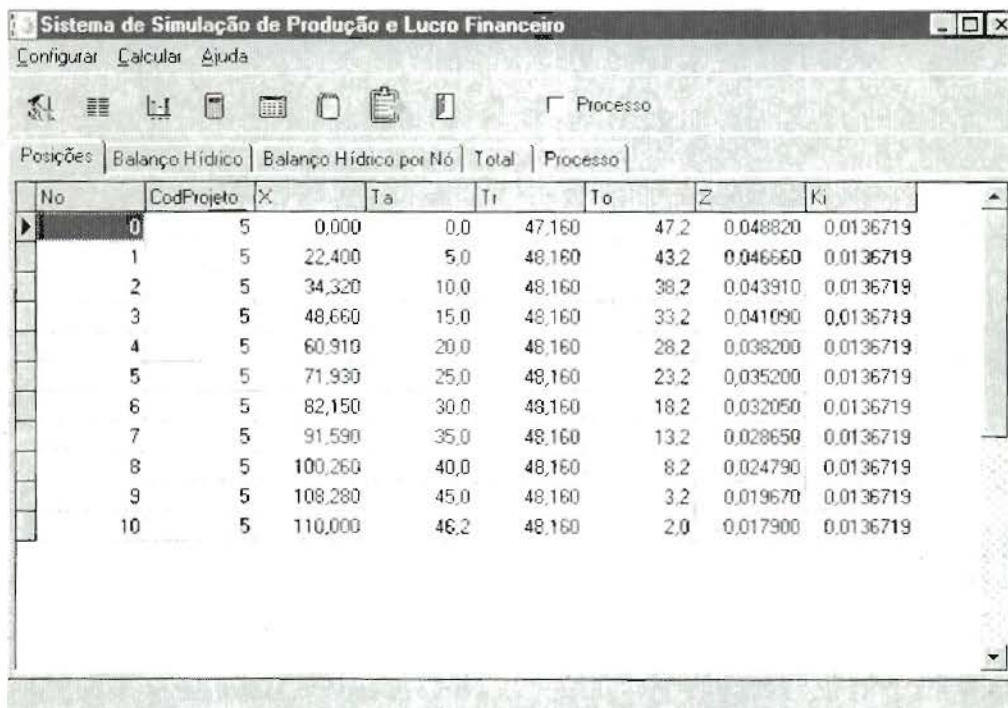


FIGURA 12. Caixa de diálogo apresentado resultados das irrigações



**Sistema de Simulação de Produção e Lucro Financeiro**

Configurar Calcular Ajuda

Processo

Posições | Balanço Hídrico | Balanço Hídrico por No | Total | Processo

CodProjeto	No	Data	TempoAplic	VazaoTrab	ETc	Infiltracao	IRN	Ks
5	1	01/01/1996	47,1551	1,8000	0,7042	46,6600000	0,7042	1,
5	1	16/01/1996	47,1551	1,8000	2,4264	0,0000000	32,0458	0,
5	1	21/01/1996	47,1551	1,8000	3,6461	46,6600000	3,6461	1,
5	1	04/02/1996	47,1551	1,8000	3,0273	46,6600000	3,0273	1,
5	2	01/01/1996	47,1551	1,8000	0,7042	43,9100000	0,7042	1,
5	2	16/01/1996	47,1551	1,8000	2,4264	0,0000000	32,0458	0,
5	2	21/01/1996	47,1551	1,8000	3,6461	43,9100000	3,6461	1,
5	2	04/02/1996	47,1551	1,8000	3,0273	43,9100000	3,0273	1,
5	3	01/01/1996	47,1551	1,8000	0,7042	41,0900000	0,7042	1,
5	3	16/01/1996	47,1551	1,8000	2,4264	0,0000000	32,0458	0,
5	3	21/01/1996	47,1551	1,8000	3,6461	41,0900000	3,6461	1,
5	3	04/02/1996	47,1551	1,8000	3,0273	41,0900000	3,0273	1,
5	4	01/01/1996	47,1551	1,8000	0,6982	38,2000000	1,3132	0,
5	4	16/01/1996	47,1551	1,8000	2,4162	0,0000000	32,6030	0,

FIGURA 13. Caixa de diálogo apresentando resultados do balanço hídrico por nó

## BIBLIOGRAFIA

COSTA, L.C., MANTOVANI, C.E., SOARES, A.A. e LEAL G.B. Sidsa: a decision support system for agriculture in Brazil. In: Information technology as a tool to assess land use options in space and time. Proceeding of an international workshop. Lima. 1997. p. 33-39.

MOTA, S.F. e OLIVEIRA O M... Indicações para elaboração de um programa de computador para cálculo do balanço hídrico diário versátil para uso no Brasil. 1987. 14 p.

OLIVEIRA, B.J.L. Modelo computacional, para determinação dos parâmetros da infiltração de água no solo, utilizando o princípio de zero-inércia. Viçosa, 1994, 97 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa.

RAGHUWANSHI, N.S. e WALLENDER, W.W. Stochastic seasonal furrow irrigation model. ASAE (na ASAE meeting presentation). Paper 942021. 1994. 20 p.

REDDY, J.M. e CLYMA, W. Optimal design of furrow irrigation systems. Em: Transact ASAE. 24, no. 3 (1981); p 617-623.

STEWART, J.I.; HAGAN, R.M. e PRUITT, W. Optimizing crop production through control of water and salinity levels. Logan: Utah State University, 1977 (PRWG-151-1).

STRELKOFF, T e KATOPODES, N.D. Border irrigation hydraulics with zero inertia. Em: J Irrig Drain Eng, ASCE. 103, no. 3 (1977). p 325-342.

TAFUR, H.H. Otimização de sistemas de irrigação por superfície em função de parâmetros hidráulicos, da cultura e econômicos. Viçosa, 1999, 107 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa.

WALKER, W.R. e HUMPHERYS, A.S. Kinematic-wave furrow irrigation model. Em: J. Irrig Drain Eng, ASCE. 109, no. 4 (1983); p. 377-392.

WALLENDER, W.W. e RAYE, J.M. Economic optimization of furrow irrigation with uniform and non-uniform soil. Em: Trans ASAE 30, no 5 (1987); p.1425-1429