



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE DOUTORADO
TEMÁTICO
DOUTORADO EM RECURSOS NATURAIS

MODELO DE SIMULAÇÃO PARA RACIONALIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA EM
IRRIGAÇÃO POR SULCO

ROBERTO VIEIRA PORDEUS

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA – BRASIL

Abril/2005

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE DOUTORADO EM RECURSOS NATURAIS**

**MODELO DE SIMULAÇÃO PARA RACIONALIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA EM
IRRIGAÇÃO POR SULCO**

ROBERTO VIEIRA PORDEUS

**Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação
em Recursos Naturais da Universidade
Federal de Campina Grande, em cumprimento
às exigências para obtenção do grau de Doutor**

Área de Concentração: Água e Solo

Sub-Área: Irrigação e Drenagem

**Orientadores: Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo
Dra. Vera Lucia Antunes de Lima**

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA – BRASIL

Abril/2005

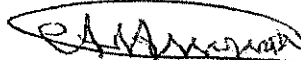


P835m	<p>Pordeus, Roberto Vieira. Modelo de simulação para racionalização do uso da água em irrigação por sulco / Roberto Vieira Pordeus. - Campina Grande, 2005. 175 f.</p> <p>Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2005.</p> <p>Referências. "Orientação : Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira Azevedo, Prof^ª. Dr^ª. Vera Lúcia Antunes de Lima".</p> <p>1. Irrigação por Sulco. 2. Vazão Ótima. 3. Racionalização de Água. 4. Simulação de Irrigação. 5. Performance da Irrigação. 6. Tese - Recursos Naturais. I. Azevedo, Carlos Alberto Vieira de. II. Lima, Vera Lúcia Antunes de. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). IV. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 631.674.1(043)</p>
-------	---

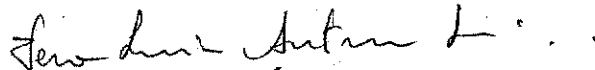
MODELO DE SIMULAÇÃO PARA RACIONALIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA EM IRRIGAÇÃO POR SULCO

APROVADA EM: 01/04/2005

BANCA EXAMINADORA:



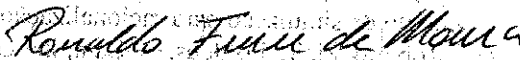
Prof. Dr. CARLOS ALBERTO VIEIRA DE AZEVEDO
Departamento de Engenharia Agrícola – DEAg
Centro de Ciências e Tecnologia - CCT
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Profa. Dra. VERA LÚCIA ANTUNES DE LIMA
Departamento de Engenharia Agrícola – DEAg
Centro de Ciências e Tecnologia - CCT
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



Prof. Dr. JOSÉ DE ARIMATEA DE MATOS
Departamento de Ciências Ambientais – DCA
Escola Superior de Agricultura de Mossoró - ESAM



Prof. Dr. RONALDO FREIRE DE MOURA
Departamento de Tecnologia Rural – DTR
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE



Prof. Dr. JOSÉ DANTAS NETO
Departamento de Engenharia Agrícola – DEAg
Centro de Ciências e Tecnologia - CCT
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



ROSIRES CATAO CURI
Departamento de Engenharia Civil - DEC
Centro de Ciências e Tecnologia - CCT
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

A minha esposa e filha
Gilsélia Braz de Macêdo Pordeus e
Roberta Larissa Braz Pordeus

DEDICO

Aos professores: Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo,
Dr. José Dantas Neto e Dra. Vera Lucia Antunes de Lima

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Desfaço-me das titulações para humildemente, agradecer:

- A DEUS e *Nossa Senhora do Carmo* (minha santa protetora), por tudo que me concede.
- A minha querida esposa, Gilsélia e minha querida filha Roberta, que me compreendem e me incentivam no dia-a-dia.
- A minha irmã Alcione e meus irmãos Ricardo e Mario, e a minha cunhada Lurdinha, por terem acreditado sempre nos meus esforços, além do carinho e respeito com que me tratam. Deus os abençoe.
- Ao CNPq, pelo apoio financeiro e instrumental, através do Projeto Integrado (Processo 470971/01-0 (NV)) coordenado pelo Professor Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo.
- Ao professor e amigo, coordenador do curso de Doutorado em Recursos Naturais, Dr. Pedro Viera de Azevedo.
- Aos professores, amigos e orientadores da UFCG, Carlos Alberto Vieira de Azevedo, José Dantas Neto, Vera Lucia Antunes de Lima e Hans Hay Ghey, não apenas pelo, muito que mim ensinaram, aprendi, tanto para a vida como para a profissão, mas também pela disponibilidade de me oferecerem esta pesquisa para conclusão do grau de Doutorado. Obrigado. A vocês, meu eterno obrigado.
- Aos amigos, Ricardo Pedrosa, Dilma Trovão, Márcia Rejane e João Audifax, pelo muito que me incentivam, pela amizade, que durante, sem dúvida, enquanto existir o último de cada um; sou feliz por tê-lo conhecido.
- Ao amigo Luiz Dantas, pelo apoio na diagramação da apresentação do trabalho de tese, cuja paciência amenizou convívio.
- Aos membros da Banca Examinadora, pelas sugestões em prol deste trabalho de Tese.
- Aos colegas doutorandos e professores, Paulo Cezar (PC), Fred, Demerval, Monteiro, Antonio Soares, Marluce e Wallace, obrigado pelo convívio, apoio e discussões acadêmicas.
- Aos funcionários do Departamento e Laboratório de Engenharia Agrícola, pela atenção que tiveram comigo.

- A todos de alguma forma contribuíram para a minha aprendizagem e desenvolvimento desta tese. O meu muito obrigado

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
	Página
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo geral	4
1.2. Objetivos específicos	4
2. REVISÃO DE LITERATURA	6
2.1. Utilização do método superficial	6
2.2. Desempenho	9
2.3. Estratégia de manejo da vazão	19
2.4. Modelos matemáticos de simulação	24
2.5. Limitações de uso dos modelos matemáticos	31
2.6. Softwares da irrigação superficial	32
3. MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1. Desenvolvimento teórico do modelo de ondas cinemáticas	37
3.1.1. Equações básicas do modelo de ondas cinemáticas	37
3.1.2. Solução numérica do modelo	39
3.1.3. Condições iniciais	45
3.1.4. Condições de contorno	46
3.1.5. Fase de depleção e recessão	46
3.1.6. Equação de infiltração d'água	47
3.1.7. Vazão máxima não erosiva	47
3.1.8. Vazão ótima	48
3.1.9. Procedimento de avaliação do sistema de irrigação por superfície	49
3.1.10. Medidas de avaliação do desempenho	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1. Validação do modelo	58
4.2. Simulação do avanço	59

4.3.	Simulação da recessão	72
4.4.	Perfil de infiltração	73
4.5.	Balanco de volume	75
4.6.	Parâmetros de desempenho	77
4.7.	Vazão ótima	81
4.8.	Análise de sensibilidade	98
4.8.1.	Fatores de ponderação espacial e temporal	98
4.8.2.	Incremento de tempo da simulação	103
4.8.3.	Rugosidade e declividade	106
4.8.4.	Parâmetros empíricos da forma do sulco	110
4.9.	Apresentação do Software SASIS	114
4.10.	Operação do Sistema	116
4.10.1.	Cálculo	116
4.10.2.	Simulação	118
4.10.3.	Vazão Ótima	124
4.10.4.	Características Gerais	127
4.10.4.1.	Configuração exigida pelo Sistema	127
4.11.	Código Fonte	128
5.	CONCLUSÕES	129
6.	RECOMENDAÇÕES	130
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
	ANEXO I – LISTA DE SIMBOLOS	141
	ANEXO II – CÓDIGO FONTE	145
	ANEXO III – RELATÓRIO DE SIMULAÇÃO SASIS	176
	ANEXO IV – RELATÓRIO DE SIMULAÇÃO SIRMOD	181
	ANEXO V – RELATÓRIO DE SIMUÇÃO VAZÃO ÓTIMA SASIS	185

LISTA DE TABELAS

	Página	
Tabela 2.1.	A irrigação na América Latina e no Caribe	8
Tabela 2.2.	Os métodos de irrigação em ha por região	8
Tabela 3.1.	Dados de campo utilizados na validação do modelo SASIS	56
Tabela 3.2.	Dados de avanço d'água medido em campo utilizados na validação do modelo SASIS	57
Tabela 4.1.	Tempo de avanço no final da área medido em campo e simulado pelos modelos SIRMOD e SASIS	60
Tabela 4.2.	Tempo de recessão simulado pelo SIRMOD e tempo de corte admitido pelo SASIS, para diferentes condições de campo	73
Tabela 4.3.	Balanço de volume d'água aplicado; infiltrado; escoado; percolado e armazenado na zona radicular calculado pelos modelos SIRMOD e SASIS, em m ³	75
Tabela 4.4.	Comparação entre os parâmetros de desempenho da irrigação por sulco com fluxo contínuo prognosticados pelos modelos SASIS e SIRMOD, para diferentes condições de campo	79
Tabela 4.5.	Performance da irrigação por sulco aberto com fluxo contínuo, função da vazão de entrada, prognosticado pelo modelo SASIS, para três condições de vazão	85
Tabela 4.6.	Análise de sensibilidade da simulação, pelo modelo SASIS, com relação à variação dos fatores de ponderações espacial (ϕ) e temporal (θ), para os dados de campo AMALGACQ (Tempo de avanço = 232 min)	100
Tabela 4.7.	Análise de sensibilidade da simulação, pelo modelo SASIS, com relação à variação do incremento de tempo de simulação, para os dados de campo AMALGACQ	104
Tabela 4.8.	Análise de sensibilidade do prognóstico da vazão máxima não erosiva, pelo modelo SASIS, com relação à variação dos parâmetros de campo rugosidade (n) e declividade (S_o), para os dados de campo AMALGACQ ($\rho_1 = 0,73$ e $\rho_2 = 2,98$, velocidade máxima = 13 m min ⁻¹)	109
Tabela 4.9.	Análise de sensibilidade do prognóstico da vazão máxima não erosiva, pelo modelo SASIS, com relação à variação dos parâmetros empíricos da forma do sulco (ρ_1) e (ρ_2), para os dados de campo AMALGACQ ($n = 0,04$ m ^{-1/3} s e $S_o = 0,0066$ m m ⁻¹ , velocidade máxima = 13 m min ⁻¹)	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1.	Esquema da progressão do fluxo superficial e da infiltração para intervalo de tempo constante	41
Figura 3.2.	Célula deformada de fluxo (Walker & Skorgeboe, 1987)	41
Figura 3.3.	Malha computacional (Walker, 2001)	44
Figura 3.4.	Componentes da água infiltrada na irrigação superficial	51
Figura 4.1.	Curvas de avanço medida em campo e simulada pelos modelos SIRMOD e SASIS; recessão simulada pelo SIRMOD e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SISRMO e SASIS (PISG1, comprimento 67 m)	62
Figura 4.2.	Curvas de avanço medida em campo e simulada pelos modelos SIRMOD e SASIS; recessão simulada pelo SIRMOD e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SISRMO e SASIS (PISG2, comprimento 84 m)	63
Figura 4.3.	Curvas de avanço medida em campo e simulada pelos modelos SIRMOD e SASIS; recessão simulada pelo SIRMOD e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SISRMO e SASIS (PISG3, comprimento 70 m)	64
Figura 4.4.	Curvas de avanço medida em campo e simulada pelos modelos SIRMOD e SASIS; recessão simulada pelo SIRMOD e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SISRMO e SASIS (PISG4, comprimento 115 m)	66
Figura 4.5.	Curvas de avanço medida em campo e simulada pelos modelos SIRMOD e SASIS; recessão simulada pelo SIRMOD e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SISRMO e SASIS (KWF, comprimento 360 m)	67
Figura 4.6.	Curvas de avanço medida em campo e simulada pelos modelos SIRMOD e SASIS; recessão simulada pelo SIRMOD e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SISRMO e SASIS (AMALGACQ, comprimento 403 m)	68
Figura 4.7.	Curvas de avanço medida em campo e simulada pelos modelos SIRMOD e SASIS; recessão simulada pelo SIRMOD e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SISRMO e SASIS (GUFCQ, comprimento 217 m)	69

Figura 4.8.	Curvas de avanço simulada pelos modelos SIRMOD e SASIS; recessão simulada pelo SIRMOD e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SISRMO e SASIS (DEMO1, comprimento 250 m)	71
Figura 4.9.	Performance da irrigação função da vazão de entrada (PISG1), vazão ótima $1,05 \text{ L s}^{-1}$, E_a - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação	84
Figura 4.10.	Performance da irrigação função da vazão de entrada (KWF), vazão ótima $1,6248 \text{ L s}^{-1}$, E_a - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação	86
Figura 4.11.	Performance da irrigação função da vazão de entrada (GUFCQ), vazão ótima $0,7879 \text{ L s}^{-1}$, E_a - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação	88
Figura 4.12.	Performance da irrigação função da vazão de entrada (DEMO1), vazão ótima $0,84 \text{ L s}^{-1}$, E_a - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação	89
Figura 4.13.	Performance da irrigação função da vazão de entrada (PISG2), vazão ótima $1,6631 \text{ L s}^{-1}$, E_a - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação	90
Figura 4.14.	Performance da irrigação função da vazão de entrada (PISG3), vazão ótima $0,64 \text{ L s}^{-1}$, E_a - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação	91
Figura 4.15.	Performance da irrigação função da vazão de entrada (PISG4), vazão ótima $0,77 \text{ L s}^{-1}$, E_a - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação	93
Figura 4.16.	Sensibilidade da simulação do tempo de avanço no final da área da irrigação por sulco com fluxo contínuo aos fatores de ponderação espacial ϕ e temporal θ , para os dados de campo AMALGACQ	101
Figura 4.17.	Sensibilidade do prognóstico da eficiência de aplicação d'água na irrigação por sulco com fluxo contínuo aos fatores de ponderação espacial ϕ e temporal θ , para os dados de campo AMALGACQ	102
Figura 4.18.	Sensibilidade do prognóstico da eficiência de armazenamento d'água na irrigação por sulco com fluxo contínuo aos fatores de ponderação espacial ϕ e temporal θ , para os dados de campo AMALGACQ	102
Figura 4.19.	Sensibilidade do prognóstico do volume d'água infiltrado na irrigação por sulco com fluxo contínuo aos fatores de ponderação espacial ϕ e temporal θ , para os dados de campo AMALGACQ	103
Figura 4.20.	Sensibilidade do prognóstico da performance da irrigação por sulco com fluxo contínuo, com relação ao incremento do tempo de simulação, para os dados de campo AMALGACQ	105

Figura 4.21.	Sensibilidade do prognostico do volume d'água infiltrado na irrigação por sulco com fluxo contínuo, com relação ao incremento do tempo de simulação, para os dados de campo AMALGACQ	105
Figura 4.22.	Sensibilidade da simulação do tempo de avanço no final da área na irrigação por sulco com fluxo contínuo, com relação ao incremento do tempo de simulação, para os dados de campo AMALGACQ	106
Figura 4.23.	Sensibilidade do prognostico da vazão máxima não erosiva na irrigação por sulco com fluxo contínuo aos parâmetros de campo rugosidade (n) e declividade (S_o), para os dados de campo AMALGACQ	108
Figura 4.24.	Sensibilidade do prognostico da vazão máxima não erosiva na irrigação por sulco com fluxo contínuo aos parâmetros empíricos da forma do sulco (ρ_1) e (ρ_2), para os dados de campo AMALGACQ	112
Figura 4.25.	Algoritmo do software SASIS	115
Figura 4.26.	Tela de abertura do SASIS	117
Figura 4.27.	Tela de inserção de dados de campo para a simulação da irrigação por sulco com fluxo contínuo e otimização de sua performance	118
Figura 4.28.	Tela exibindo os resultados da simulação do software SASIS	119
Figura 4.29.	Tela de visualização da primeira página de um relatório dos dados da simulação da irrigação por sulco com fluxo contínuo e do prognostico de sua performance	120
Figura 4.30.	Tela de visualização da segunda página de um relatório dos dados da simulação da irrigação por sulco com fluxo contínuo e do prognostico de sua performance	121
Figura 4.31.	Tela de visualização da trajetória de avanço da água ao longo do sulco	122
Figura 4.32.	Tela de visualização do perfil de infiltração da água no solo em irrigação por sulco com fluxo contínuo	123
Figura 4.33.	Tela de visualização do relatório do perfil de infiltração da água no solo em irrigação por sulco com fluxo contínuo	124
Figura 4.34.	Tela de visualização do processo de otimização da performance da irrigação por sulco com fluxo contínuo	125
Figura 4.35.	Tela de visualização da página 1 do relatório da otimização da performance da irrigação por sulco com fluxo contínuo	126
Figura 4.36.	Tela de visualização da página 2 do relatório da otimização da performance da irrigação por sulco com fluxo contínuo	127

MODELO DE SIMULAÇÃO PARA RACIONALIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA EM IRRIGAÇÃO POR SULCO

RESUMO

Os sistemas de irrigação por superfície são os mais utilizados não apenas no Brasil mas, no mundo inteiro principalmente devido à economia de energia e sua facilidade de operação; no entanto, apresentam baixos níveis de desempenho, como consequência, geralmente, do dimensionamento e manejo inadequados. Assim sendo, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver uma ferramenta capaz de possibilitar a otimização do desempenho da irrigação por sulco com fluxo contínuo, a partir de sucessivas simulações da fase de avanço e respectivos prognósticos dos parâmetros de desempenho do sistema de irrigação. As simulações da fase de avanço foram realizadas pelo modelo de ondas cinemáticas implementado nesta pesquisa com base no desenvolvimento teórico apresentado por Walker & Humpherys (1983). A metodologia de Burt et al. (1997) foi utilizada para avaliar os parâmetros de desempenho do sistema de irrigação por sulco. O modelo proposto, escrito na linguagem de programação DELPHI 5.0 e denominado SASIS, "Software Aplicado a Simulação da Irrigação por Superfície", teve sua validação testada para diferentes condições de campo. Os resultados demonstraram que a vazão aplicada exerce influência decisiva nos parâmetros de desempenho do sistema de irrigação, tendo os melhores desempenhos ocorridos para vazões próximas da mínima permitida. Constatou-se que o parâmetro de campo que mais dificulta a otimização é a infiltração, enquanto o comprimento e a declividade não interferem de forma decisiva, podendo a mesma ser alcançada para uma grande faixa de valores desses parâmetros; verificou-se, ainda, que em solos com elevadas taxas de infiltração, a maior dificuldade na otimização é minimizar as perdas por percolação; já nos solos com baixas taxas de infiltração tanto as perdas por percolação como por escoamento podem ser facilmente minimizadas. Os resultados desta pesquisa mostram a necessidade da otimização no sistema de irrigação por sulco com fluxo contínuo, identificando ainda que em algumas condições de campo podem-se alcançar altos níveis de desempenho através da otimização. O modelo desenvolvido nesta pesquisa apresenta mecanismos eficazes na realização de inúmeras simulações, numa faixa de vazão compreendida entre a mínima e a máxima permitidas, objetivando-se determinar a relação entre vazão e eficiência de aplicação d'água, taxas de percolação e de escoamento, e consequentemente otimizar o desempenho do sistema de irrigação por sulco com fluxo contínuo.

Palavras-chave: Irrigação por sulco, simulação, otimização

SIMULATION MODEL FOR RATIONALIZATION OF THE WATER IN FURROW IRRIGATION

ABSTRACT

The surface irrigation systems are the most used not just in Brazil but, in the whole world mainly due to the economy of energy and its operation easiness; however, these systems present low levels of performance, usually, as a consequence of inadequate design and management. Thus, the objective of this research was to develop a tool capable to make possible the optimization of the continuous flow furrow irrigation performance, making successive simulations of the advance phase and respective prognostics of the performance parameters of the irrigation system. The simulations of the advance phase were accomplished by the kinematic-wave model implemented in this research basing in the theoretical development presented by Walker & Humpherys (1983). The methodology of Burt et al. (1997) was used to evaluate the furrow irrigation performance parameters. The proposed model was written in the programming language DELPHI 5.0 and denominated SASIS, "Software Applied to Simulation of the Surface Irrigation", and had its validation tested for different field conditions. The results demonstrated that the applied discharge had decisive influence on the performance parameters of the furrow irrigation system, in which the best performance happened for discharges close to allowable minimum values. It was verified that the field parameter that make more difficulty the optimization is the infiltration, while the length and the slope don't interfere in a decisive way, allowing the optimization be reached for a great strip of values of those parameters. It still was verified that in soils with high infiltration rates, the greatest difficulty in the optimization is to minimize the deep percolation losses, while in soils with low infiltration rates the deep percolation losses as well as the runoff losses could be easily minimized. The results of this research show the need of the optimization in the furrow irrigation systems with continuous flow, identifying although that for some field conditions high levels of performance can be reached by optimization. The model developed in this research presents effective mechanisms in the accomplishment of countless simulations, in a discharge strip understood between the minimum and the maximum allowable values, aiming to determine the relationship between discharge and water application efficiency, deep percolation and runoff rates, and consequently to optimize the performance of the furrow irrigation systems with continuous flow.

Key words: Furrow Irrigation, simulation, optimization

1. INTRODUÇÃO

Uma das maiores preocupações do mundo está voltada à economia da água que, de acordo com publicações do Seminário Internacional sobre Uso Eficiente da Água, em 1991, a agricultura irrigada é responsável, a nível mundial, por mais de 80% do consumo de água, apresentando, entretanto eficiência média de apenas 37%. A água é um bem caro e escasso, atualmente os governantes e os técnicos têm-se preocupado com o uso racional da água, criando-se políticas de gestão dos recursos hídricos, visando maior controle e o uso mais eficiente da água, que a cada dia torna-se mais escasso, consequência da falta de chuva e contaminação da água existente por poluentes industriais, esgotos e resíduos da água de irrigação.

É importante observar também que a irrigação representa o uso mais intenso dos recursos hídricos, sendo responsável por aproximadamente 80 por cento do consumo de água doce do mundo. Além disso, ela pode carrear para os corpos de água superficiais e subterrâneos as substâncias empregadas para o aumento da produtividade da agricultura. Entre tais substâncias destacam-se os fertilizantes sintéticos e os defensivos agrícolas. Tendo em conta que atualmente as irrigações consomem aproximadamente 80% da água disponível, é fácil compreender a importância de melhorar a eficiência dos mesmos.

Outro aspecto de importância fundamental diz respeito ao teor de sais dissolvidos na água empregada para irrigação. Excesso de sais dissolvidos pode afetar a atividade osmótica das plantas, bem como prejudicar o aproveitamento de nutrientes do

solo, influir diretamente no metabolismo das plantas e ainda reduzir a permeabilidade do solo, dificultando a drenagem e a aeração. Projetos de irrigação mal-operados arruinaram grandes áreas de solo originalmente férteis devido ao efeito da salinização e encharcamento dos solos.

A área irrigada no mundo era, no início do século XX, de aproximadamente, 40 milhões de hectares; no ano de 1987, esta área aumentou para 285 milhões, dos quais 62,5% correspondiam à irrigação por superfície. No Brasil, segundo Bernardo (1995), em 1988 existiam 2,205 milhões de hectares irrigados, dentre estes 61,9% correspondiam à irrigação por superfície; já em 1990 a área irrigada no Brasil aumentou para 2,7 milhões de hectares (CODEVASF, 1996). Acredita-se que nos dias de hoje essa área seja superior.

O método de irrigação por superfície é considerado a forma mais antiga de aplicação artificial de água no solo, para atender às demandas hídricas das culturas; trata-se do mais utilizado no mundo, sobretudo nos continentes asiático e africano e até mesmo nos Estados Unidos e nos países mais desenvolvidos da Europa. No Brasil, apesar da falta de informações precisas, ele ocupa maior área irrigada devido, sem dúvida, ao seu pioneirismo durante a implantação de grandes projetos públicos de irrigação, em particular no Nordeste.

Apesar da irrigação por superfície ser a mais utilizada no mundo, ela é considerada de baixa eficiência de aplicação d'água, principalmente o sistema de irrigação por sulco, em que os de sulco aberto são os responsáveis pelos menores índices de eficiência. A baixa eficiência nos sistemas de irrigação por superfície se deve em grande parte, à falta de um dimensionamento criterioso e à prática de manejo inadequado da irrigação. Segundo Rezende et al. (1988), níveis reduzidos de desempenho em sistemas de irrigação por sulcos podem ser atribuídos tanto ao dimensionamento incorreto quanto à operação e manejo insatisfatórios.

Para melhorar a eficiência de aplicação e de distribuição d'água, tem-se utilizado em alguns projetos, a vazão máxima não erosiva, reduzindo a vazão em 30 a 50% quando a frente de avanço atinge o final do sulco; outra alternativa é a utilização de vazões intermitentes na distribuição da água nos sulcos; esses dois métodos, apesar de apresentarem melhora no desempenho dos sistemas de irrigação por sulco, apresentam a desvantagem de exigir, do agricultor, mais mão-de-obra e mais investimento em equipamentos. Na prática, observa-se que o uso de vazão constante é o que predomina nos

projetos de irrigação por sulco, o que se deve, provavelmente, à tradição do agricultor em utilizar apenas uma vazão na aplicação de água durante a irrigação e a facilidade de operação, tanto com o uso de sifões como através de valas, na distribuição da água nos sulcos.

A irrigação por sulcos apresenta diferentes variáveis de campo e operacionais do sistema que influenciam seu desempenho, como vazão e tempo de aplicação d'água, dimensões, declividade e rugosidade da superfície do solo, forma geométrica do sulco e características de infiltração d'água no solo; os valores de variáveis como declividade, rugosidade, geometria do sulco e taxa de infiltração, correspondem a condições específicas de campo, para as quais o projetista deverá definir vazão, tempo de aplicação d'água, comprimento, espaçamento entre sulcos e lâmina. Em um bom projeto de irrigação por sulco deve-se ser consideradas essas variáveis e as interações entre as mesmas (Wu & Liang, 1970; Reddy & Clyma, 1981).

Com ajuda dos computadores, vêm sendo desenvolvidos modelos matemáticos para simular as fases da irrigação por superfície, que levam em consideração, tanto no dimensionamento como no manejo desses sistemas, as diferentes interações entre as variáveis de campo e operacionais. Esses modelos são capazes de prever a eficiência desses sistemas, facilitando aos projetistas tomadas de decisões com vistas à melhoria da eficiência dos atuais e futuros projetos de irrigação por superfície a serem projetados e implantados. Os procedimentos matemáticos utilizados na simulação, mais comuns em ordem de complexidade, do mais simples para o mais complexo, são balanço volumétrico, onda cinemática, zero inércia e hidrodinâmico.

O modelamento matemático da irrigação por superfície tem processos complexos na hidráulica do escoamento superficial. Esses processos têm sido simulados por modelos computacionais com amplo grau de complexidade e precisão (Strelkoff & Katopodes, 1977; Elliott et al., 1982; Walker & Humpherys, 1983; Strelkoff & Souza, 1984; Rayej & Wallender, 1985; Azevedo, 1992); esses modelos simulam o avanço e a recessão da água ao longo da superfície do solo e o volume de água infiltrado, escoado e percolado.

O modelo hidrodinâmico, resolve completamente as equações de Saint-Venant (equação da continuidade e do movimento), isto é, sem assumir aproximações simplificativas; zero inércia, baseia-se também nessas equações, mas negligenciado na equação do movimento os termos inerciais; e onda cinemática, baseia-se apenas na

equação da continuidade e na equação de Manning. Esses três modelos são baseados na solução numérica das equações diferenciais da conservação de massa e de energia e, segundo vários estudos, predizem mais adequadamente o processo da irrigação por superfície que o modelo do balanço de volume (Raghuwanshi & Wallender,1996).

O modelo hidrodinâmico é o mais preciso dos modelos, razão por que é considerado padrão, porém os modelos zero inércia e onda cinemática, apesar de serem mais simples apresentam, em termos gerais, precisão satisfatória sendo, portanto, boas alternativas na simulação da irrigação por superfície (Strelkoff & Katopodes,1977; Rayej & Wallender,1985; Azevedo,1992; Valiantzas,1999).

Os diferentes modelos de simulação da irrigação por superfície foram desenvolvidos para simular um evento de irrigação isolado, assumindo que não existe variabilidade espacial nos parâmetros de campo (infiltração, rugosidade, declividade e seção transversal); na prática tem-se verificado a validade desta hipótese, considerando que as simulações têm se aproximado bastante das medições de campo das fases. No entanto, as variabilidades temporais nesses parâmetros são sempre levadas em conta, uma vez que para a avaliação de qualquer evento de irrigação ao longo da estação de cultivo, novas medições dos parâmetros de campo são realizadas.

Objetivo geral

Objetivou-se, através desta pesquisa, desenvolver um modelo matemático computacional de simulação e otimização da irrigação por sulco com fluxo contínuo, capaz de, através de simulações da fase de avanço, prognosticar o desempenho de um evento de irrigação e selecionar a vazão ótima na irrigação por sulco com fluxo contínuo, isto é, aquela que maximiza a eficiência de aplicação d'água, balanceando as perdas por percolação e escoamento.

Objetivos específicos

1. Desenvolver código computacional para o modelo em linguagem DELPHI 5.0, a qual foi escolhida por ser orientada a objeto, com integração total ao Windows em todas as suas versões, que permite, de maneira clara, prática, produtiva e eficiente, atualização e portabilidade de aplicativos nele desenvolvidos.

2. Realizar análise de sensibilidade da simulação do modelo aos parâmetros de ponderação espacial e temporal dos perfis superficial e subsuperficial de fluxo e do incremento de tempo da simulação.
3. Realizar análise de sensibilidade da equação da vazão máxima aos valores atribuídos às variáveis declividade, rugosidade, e parâmetros da seção transversal de fluxo.
4. Validar o modelo com dados de campo e com o modelo SIRMOD (Surface Irrigation Simulation Model) desenvolvido por Walker (1989), comparando-se o avanço simulado por ele com o medido em campo e simulado pelo SIRMOD e, também, comparando o prognóstico feito pelo modelo proposto, do perfil de infiltração, balanço de volume e dos parâmetros de avaliação do desempenho do sistema de irrigação com o fornecido pelo modelo SIRMOD.
5. Verificar hipótese, feita no modelo proposto, em negligenciar a fase de recessão na irrigação por sulco com fluxo contínuo, considerando que o final do evento de irrigação ocorra no momento de suspensão da aplicação da vazão no sulco; verificação esta feita através de comparações entre simulações da fase de recessão realizadas pelo modelo SIRMOD e a admitida nesta pesquisa.
6. Criar no modelo, mecanismos capazes de realizar inúmeras simulações, numa faixa de vazão compreendida entre a mínima e a máxima permitidas, objetivando-se determinar a relação entre vazão e a eficiência de aplicação d'água, taxas de percolação e de escoamento, e conseqüentemente otimizar o desempenho do sistema de irrigação por sulco com fluxo contínuo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Utilização do método superficial

Segundo Soares (1992), o método de irrigação por superfície se constitui no processo mais antigo de aplicação de água no solo e, conforme Scaloppi (1995), o mesmo prevalece na maioria das regiões do mundo, em proporção superior a 80%. Informações publicadas no Irrigation Journal (Shank, 1997) revelam que a área irrigada por sistemas superficiais nos Estados Unidos em 1991, estaria em torno de 13,45 milhões de hectares, correspondendo a cerca de 57% do total irrigado naquele país. De acordo com Bjorneber & Strelkoff (2001) e Strelkoff & Bjorneber (2001) a irrigação por superfície ainda é usada em aproximadamente 50% da terra irrigada nos Estados Unidos, dos quais 50%, dessas áreas é irrigado com sulcos.

Segundo Castro (2001), dados da FAO de 1997 mostram que 17,73 % da área cultivada do mundo é irrigada, ou seja 267.727.000 ha. O continente que mais área irrigada tem em relação à área cultivada é o asiático com 33,57% de área irrigada. Entre os países deste continente, destaca-se o Paquistão que tem uma área cultivada de 21.600.000 ha sendo 17.580.000 ha irrigados, ou seja 81,39%. Depois vem o Iraque (63,63 %), Japão (62,89 %) e Israel (45,54 %). Depois a América do Norte e Central onde 11,39% de área cultivada é irrigada, sendo que os países México (23,81 %) e Cuba (20,45 %) são os países que tem maior área irrigada em relação à cultivada. Na América do Sul, o Brasil tem uma

área irrigada muito pequena comparada com os outros países (4,85 %). O Chile (55,29 %) e o Peru (41,90 %) têm grandes áreas irrigadas em relação às áreas cultivadas.

No Brasil, segundo informações dadas pela FAO (2000), a área total irrigada por sistemas superficiais é de 1 688 485 milhões de hectares, o correspondente a mais ou menos 58,8% da área irrigada. Segundo levantamento realizado pela FAO em na ca a irrigação por superfície é responsável por cerca de 76% da área total irrigada, visto que as terras nessas áreas são geralmente dominadas por argilas que, quando secas, apresentam fendas profundas e se tornam plásticas quando molhadas, favorecendo o uso do sistema por sulco (Smith, et al., 1983), apud Esfandiari & Maheshwari (2001). Segundo esses autores, após o sistema por faixas, a irrigação por sulco na Austrália é um dos mais utilizados para irrigação de culturas, como milho, algodão, cana-de-açúcar e legumes, em que o comprimento dos sulcos varia de 400 a 2000 m, com declividade de 1:350 até 1:2000; o sistema, segundo os autores tem baixo capital de investimento comparado com os métodos pressurizados.

Segundo a FAO (2000), a irrigação no mundo se expandiu depressa nas últimas décadas, chegando a uma superfície total irrigada aproximada de 268 milhões de hectares em 1997. Este crescimento na região de América Latina e no Caribe também foi proporcionalmente importante no período 1960-1997, embora a região só constitui uma porcentagem pequena da superfície irrigada no mundo. Segundo a FAO, os países dessas regiões têm algo mais de 18 milhões de hectares de superfície irrigada, cerca de 7 por cento do total de superfície irrigada no mundo. A seguir a Tabela 2.1, apresenta de forma resumida, alguns países e a área total levantada pela FAO.

Tabela 2.1 . A irrigação na América Latina e no Caribe

País	Ano	Irrigação por Superfície		Irrigação Por Aspersão		Irrigação Localizada		Total ha
		ha	(%)	ha	(%)	ha	(%)	
Argentina	1988	1 389 544	95,5	62 207	4,5	0,0	0,0	1 454 751
Chile	1996	1 807 324	95,1	30 523	1,6	62 153	3,3	1 900 000
Brasil	1998	1 688 485	58,8	1 005 606	35,0	176 113	6,1	2 870 204
México	1997	5 802 182	92,7	310 800	5,0	143 050	2,3	6 256 032
Costa Rica	1997	85 484	82,9	3 900	3,8	13 700	13,3	103 084
Cuba	1997	366 644	46,5	402 663	51,0	19 492	2,5	788 799
Equador	1997	863 370	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	863 370
Guatemala	1997	129 803	100,00	0,0	0,0	0,0	0,0	129 803
Honduras	1997	73 210	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	73 120
Perú	1998	1 175 548	98,4	11 980	1,0	7 700	0,6	1 195 228
Urugai	1998	169 000	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	169 000
TOTAL	-	15 672 050	86,7	1 960 365	10,8	453 105	2,5	18 085 520

Fonte FAO, 2000, Reports, 20, ISSN 1020 1203, Irrigação na América Latina e no Caribe

Segundo Christofidis, (1999), a irrigação no Brasil começou a ter expressão em 1950 com uma área irrigada de 64 mil ha e evoluiu de forma contínua chegando no final da década de 90 a uma área irrigada de 2.870.000 ha. A distribuição da irrigação por regiões é apresentada na Tabela 2.2. De acordo com o autor, a participação da área irrigada no setor agrícola brasileira em 1998 é de 6,2%, representando uma área total de 2, 87 milhões de hectares. A irrigação no país consome cerca de 64,7% da água utilizada.

Tabela 2.2 . Os métodos de irrigação em ha por região

Região	Superfície	Aspersão	Pivô Central	Localizada	TOTAL
Norte	82 070	3 530	390	670	86 660
Nordeste	164 711	168 1456	83 762	78 751	495 370
Sudeste	237 150	239 916	348 854	65 054	890 974
Sul	1 094 720	53 220	20 970	26 530	1 195 440
Centro-Oeste	57 460	39 582	95 310	9 480	201 760
Brasil	1 636 111	504 394	549 286	180 413	2 870 204

Fonte: Christofidis, 1999

Estima-se que do total da área irrigada no Brasil, a irrigação por superfície seja responsável por uns 60%; esta quantidade deve-se, provavelmente, aos baixos custos de implantação e facilidade de operação. Grande parte dessas áreas foi implantada pelo setor público. De acordo com Bernardo (1995), o sistema de irrigação por superfície é o de menor custo por unidade de área, os de aspersão de custo médio e os de gotejamento de maior custo.

Raras instituições de ensino superior no Brasil habilitam os estudantes de graduação em Agronomia e Engenharia Agrícola para promoverem a implantação adequada de sistemas de irrigação por superfície; um outro aspecto é que esses sistemas não apresentam potencial para a venda de equipamentos, não existindo neles um interesse comercial envolvido, inibindo, de certa forma, sua utilização. Portanto, a utilização desses sistemas fica, geralmente restrita ao interesse despertado pelo próprio agricultor ou, então, de uma cooperativa melhor informada ou, ainda de órgãos extensionistas governamentais diferenciados, Scaloppi (2003).

A irrigação superficial ou por gravidade se caracteriza pela utilização da superfície do solo, como meio de condução da água. Este método se adapta a qualquer tipo de cultura e à maioria dos solos, principalmente aos de textura média a fina, sendo, no entanto restritivo aos solos de textura grossa. Segundo Hart et al. (1968), este método é ótimo para solos com alta capacidade de retenção da água e condutividades hidráulicas que permitam significativo movimento vertical e horizontal da água. A água neste método pode ser aplicada de três maneiras: por meio de faixas, tabuleiros e sulcos. O sistema por sulco é o mais utilizado; no entanto, na prática é o que apresenta os menores desempenho de aplicação d'água, principalmente os sulcos abertos, por ocorrer perda por escoamento superficial.

2.2. Desempenho

Os sistemas de irrigação superficial apresentam o potencial de aplicar água aos cultivos, com eficiências de 70 a 85% (Merriam & Keller, 1978); na verdade, alguns sistemas automatizados têm favorecido eficiência em torno de 90% (Fischback & Somerhalder, 1971); no entanto, a maioria dos projetos de irrigação no mundo tem trabalhado com eficiências de aplicação em torno de 40% a 50% ou com valores ainda

menores (Bos & Nugteren, 1974; Clyma et al., 1975; Kruse & Heermann, 1977), apud Azevedo et al. (1992).

Segundo Daker (1988) o método de irrigação superficial permite uma eficiência de aplicação d'água relativamente alta, podendo atingir até 80% em condições favoráveis, mas Bos & Nugteren (1974) e Clyma et al. (1975) afirmam que os projetos de irrigação por superfície trabalham, na sua maioria e em todo o mundo, com eficiências em torno de 40 a 50%. Esses sistemas têm até recebido a imerecida reputação de sistemas de baixos níveis de desempenho. De acordo com Merriam (1976) apud por Scaloppi (1986) o uso inadequado e o desconhecimento das potencialidades dos sistemas por superfície têm resultado em reduzida eficiência de aplicação d'água. Segundo Carvalho et al. (1999) na irrigação por sulco, a vazão aplicada é um dos fatores que mais afetam a eficiência de aplicação e a uniformidade de distribuição d'água; por exemplo, a aplicação de uma vazão constante, estratégia de manejo mais utilizada no mundo, oferece grandes riscos a esses dois aspectos do desempenho do sistema porque, quando se escolhe uma vazão muito grande, a fase de avanço será mais rápida diminuindo, conseqüentemente, as perdas por percolação e a desuniformidade de distribuição d'água, mas as perdas por escoamento superficial serão, com certeza, excessivas; por outro lado, ao se escolher uma vazão muito pequena as perdas por escoamento serão minimizadas, em detrimento das perdas por percolação e do grau de desuniformidade de distribuição d'água, que serão desastrosos; o correto será, então, se escolher uma vazão que contrabalance as perdas por percolação e escoamento superficial.

O processo da irrigação superficial se dá em quatro fases: avanço, armazenamento, depleção e recessão, em que a primeira tem início quando a água é aduzida e termina quando a frente de avanço atinge o final do sulco ou cobre toda a parcela de uma faixa ou tabuleiro, começando a fase de armazenamento, na qual o nível da água na superfície do solo se eleva terminando quando a vazão é suspensa, instante em que surge a fase de depleção, encerrando-se quando a água desaparece em qualquer porção ao longo do sulco ou faixa que, em geral, ocorre na cabeceira. Dar-se então, a fase de recessão, quando começa ocorrer o rebaixamento do nível da água, a qual termina quando toda a água desaparece da superfície do solo. Em irrigação por sulco Walker (2001) considera as fases de armazenamento e depleção como uma única fase, ou seja, o evento da irrigação por sulco é dividido em três fases: avanço, armazenamento/depleção e recessão.

Conforme Souza (1983), o acompanhamento das diversas fases da irrigação superficial permite a determinação das curvas de avanço e recessão; para tal torna-se necessário ir ao campo para medir o tempo em que a água avança até pontos específicos preestabelecidos, x_r , e o tempo do seu desaparecimento nesses mesmos pontos, t_r . Em papel milimetrado, plotam-se os pontos (x_r , t_r) determinando-se as curvas de avanço e recessão. Uma outra possibilidade é a simulação matemática das fases, que, de certa forma, diminui os requerimentos de medições de campo, que consomem tempo e dinheiro (Azevedo, 1992). De acordo com Souza (1983) o conhecimento das curvas de avanço e de recessão e da equação característica de infiltração do solo, é essencial para se avaliar a performance de um sistema de irrigação superficial no que tange à determinação de parâmetros que expressam a qualidade da irrigação, notadamente as eficiências de aplicação (E_a), armazenamento (E_s), distribuição (E_d) e dos índices de percolação (I_p) e de "runoff" (I_r).

A adequação da irrigação superficial depende da água armazenada na zona das raízes, da percolação profunda, do escoamento superficial, da uniformidade de distribuição da água aplicada e do déficit de água na zona das raízes, após a irrigação. Segundo Renault & Wallender (1997a), a taxa de armazenamento na superfície é de grande importância na hidrologia da irrigação por superfície.

Na irrigação por superfície as perdas d'água podem ocorrer por infiltração profunda e/ou por escoamento no final da área cultivada. A redução dessas perdas constitui na melhoria do manejo da irrigação por sulcos. Tanto os parâmetros operacionais (vazão e tempo de aplicação d'água) como os de campo (geometria da seção transversal de fluxo, comprimento da área, declividade, rugosidade e infiltração) afetam essas perdas d'água. O processo hidráulico da irrigação por sulcos é complexo, o que dificulta sua análise. Segundo Souza (1983), a análise da irrigação por sulcos é mais difícil que a da irrigação por faixas, devido à complexidade introduzida pela forma dos sulcos e suas relações com a taxa de infiltração.

Segundo Azevedo (1992) e Azevedo & Walker (1993), a baixa eficiência de aplicação dos projetos de irrigação superficial se deve a um inadequado dimensionamento e a um manejo inapropriado, os quais tornam-se complicados devido à variação espacial e temporal dos parâmetros de campo, especialmente os de infiltração da água no solo. De acordo com Souza (1992) os projetos de irrigação no Brasil são, em geral, operados com

baixa eficiência, porque a ótica utilizada é a de que os sistemas de irrigação devem ser bem projetados e construídos, mas o manejo do sistema após a implantação não é levado em consideração, ficando na dependência exclusiva, com raras exceções, da sensibilidade e experiência do irrigante.

Augusto et al. (1985) realizaram um experimento com o objetivo de avaliar os fatores que influenciavam a eficiência e a uniformidade de distribuição da água de um sistema de irrigação por sulcos em declive, utilizando seis diferentes vazões. Os resultados mostraram baixa eficiência de aplicação, a qual, conforme os autores, pode ser incrementada, através de três artifícios: aplicando-se água em tempo real necessário para infiltrar a lâmina desejada no final do sulco, e uma vazão menor ou, então, aumentando o comprimento do sulco, caso em que se torna viável o uso da técnica de redução de vazão.

Azevedo et al. (2003a) avaliaram o efeito do tempo de aplicação da lâmina requerida no desempenho do sistema de irrigação por sulco para diferentes lâminas requeridas, em diferentes tipos de solo. Essa influência foi verificada através de uma análise de sensibilidade realizada a partir de simulações matemáticas do processo de irrigação por sulco, baseadas em dados de campo em tempo real. Para os solos de textura mais fina, a situação mais comprometida para o desempenho do sistema de irrigação se verificou quando se aplica tanto uma lâmina pequena como grande num tempo de aplicação pequeno; enquanto em solos de textura mais grossa o risco está em se aplicar uma pequena lâmina num tempo de aplicação grande ou o oposto, isto é, uma lâmina grande num tempo de aplicação pequeno. De acordo com os autores existe um efeito conjugado do tempo de aplicação e da lâmina a ser aplicada no final do sulco no desempenho do sistema, também concluíram que em solo de textura mais fina, independente da lâmina, para um tempo de aplicação maior, se tem melhor eficiência de aplicação. Nos solos argilosos, a eficiência de aplicação é mais comprometida para tempo de aplicação maior, enquanto, nos solos de textura grossa a eficiência de aplicação é mais afetada quando se aplica pequena lâmina num tempo de aplicação grande e uma lâmina grande num tempo de aplicação pequeno.

O efeito do tempo de oportunidade de infiltração e do comprimento do sulco no tempo de aplicação d'água para diferentes tipos de solos, foi pesquisado por Azevedo et al. (2003c), essa influência foi verificada através de uma análise de sensibilidade realizada a partir de simulações matemáticas do processo da irrigação por sulco, baseadas em dados

de campo reais. O estudo mostrou que nos solos argilosos, para sulcos de comprimento menores, o aumento do tempo de oportunidade, em decorrência do aumento da lâmina requerida, registra maior variação no tempo de aplicação, pela redução da vazão d'água aplicada no sulco. No solo franco-arenoso, para o comprimento menor, o coeficiente de variação apresentou valor semelhante ao solo argiloso, no entanto, para comprimento maior apresentou valor bem menor, o que comprova que em sulco longo deve-se aumentar a vazão de aplicação d'água. Estudos mostram que para os solos de textura fina, por possuir maior quantidade de microporos, a infiltração torna-se dificultada, e que o escoamento apresenta o potencial maior do que a percolação. Enquanto que o solo de textura mais grossa possui maior quantidade de macroporos, com infiltração mais rápida, e as perdas por percolação predominaram diante das perdas por escoamento.

O processo de dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação superficiais torna-se complicado devido às dificuldades que existem em se medir (ou estimar) as variações espacial e temporal nos parâmetros de campo, especialmente as variações nas características de infiltração d'água no solo; mas, em tempo real, é possível ter-se um monitoramento delas que favoreça um dimensionamento e manejo adequados (Azevedo, 1992; Santana, 1996) obtendo-se um desempenho comparável ao dos sistemas pressurizados.

Silveira et al. (2000a) verificaram efeito acentuado do tempo de oportunidade de infiltração no desempenho dos sistemas de irrigação por sulco e constataram que tanto nos solos argilosos como nos franco-arenosos, para os sulcos de comprimento menores a eficiência de aplicação decresce a medida em que se aumenta o tempo de oportunidade de infiltração, e nos sulcos de comprimento maiores a eficiência de aplicação tendeu a crescer com o aumento do tempo de oportunidade. Estes autores também analisaram a influência da lâmina requerida no desempenho do sistema de irrigação por sulco e mostraram que em sulcos curtos uma lâmina grande é o fator que mais compromete o desempenho do sistema, sobretudo nos de textura mais fina, devido a um potencial maior de perda por escoamento. Em sulcos longos se deu o contrário com relação ao efeito da lâmina no desempenho do sistema, em especial nos solos de textura mais grossa.

Azevedo et al. (2003b) avaliaram a influência da lâmina requerida de irrigação por sulco no desempenho desse sistema, para diferentes tipos de solo e

comprimento de sulco. Para os tipos de solos estudados, observaram que no comprimento de sulco de 100 m, a eficiência de aplicação decresce à medida que a lâmina requerida aumenta, e no sulco com comprimento de 250 m a eficiência de aplicação aumenta à medida que a lâmina requerida aumenta. Os autores constataram que em sulcos curtos uma grande lâmina é o que mais compromete o desempenho do sistema, devido a um potencial maior de perdas por escoamento no final dos sulcos, principalmente em solos de textura mais fina. Em sulcos longos se dá o contrário com relação ao efeito da lâmina no desempenho do sistema, principalmente em solos de textura mais grossa.

Silveira et al. (2001a) estudando os efeitos do comprimento de sulco no tempo de aplicação d'água para diferentes lâminas d'água requerida e tipos de solo, constataram que o tempo de aplicação d'água aumenta de acordo com o aumento no comprimento do sulco. Para lâminas de menores valores a duração da fase de armazenamento diminui, acontecendo o contrário para lâminas maiores. Segundo os autores, independente da lâmina requerida e do tipo de solo, para sulcos maiores sempre tem-se maiores tempo de aplicação.

Silveira et al. (2001b), realizaram um estudo, através de simulações pelo procedimento matemático hidrodinâmico, do processo da irrigação por sulco, objetivando observar o comportamento das perdas d'água por escoamento, para diferentes lâminas d'água e comprimentos de sulcos. Em condições de irrigação adequada, constaram que as perdas por escoamento crescem com o aumento da lâmina requerida, independente do comprimento de sulco e do tipo de solo estudado. Observou-se que a perda por escoamento é o principal responsável pela redução do desempenho de irrigação para os sulcos curtos o mesmo não ocorre com os sulcos longos. De acordo com o resultado do estudo do efeito da lâmina requerida na taxa de escoamento para diferentes comprimentos de sulco, os autores concluíram que os sulcos curtos são os mais afetados pelo escoamento da água, sendo os solos de textura fina os mais afetados com o crescimento da aplicação da lâmina requerida, enquanto que para sulcos longo o desempenho da irrigação cresce com o aumento da lâmina requerida, neste caso a taxa de escoamento aumenta mas em quantidade apesar de aumentar um pouco não afeta o desempenho, pois é compensado pela redução da percolação profunda.

De acordo com Garrido (1992), os fatores que contribuem para a baixa eficiência de aplicação por sulco, são: a diferença no tempo de oportunidade para

infiltração d'água ao longo do sulco, a variabilidade espacial e temporal nas características de infiltração e o manejo inadequado. Lima Filho (1996) acrescenta, ainda, que o desempenho da irrigação por sulco é influenciado por outras variáveis, como a vazão de entrada, o tempo de corte da água, o comprimento dos sulcos, a sua declividade e o espaçamento entre eles.

Carvalho et al. (1995) analisaram num solo aluvional, a influência do perfil geométrico do sulco, no desempenho da irrigação e constataram que nos perfis parabólicos ocorreu tendência de se obter maiores eficiências de aplicação (E_a) em relação aos perfis triangular e trapezoidal. De acordo com Pordeus et al. (2001), os sulcos apresentam dimensões variadas nas seções transversal e longitudinal, em função da textura do solo e da cultura explorada. Para solos com baixa velocidade de infiltração, recomendam-se sulcos rasos e largos, que geralmente apresentam a forma de U, enquanto para solos com alta velocidade de infiltração, recomenda-se sulco estreito e mais profundos, geralmente em forma de V. Essas geometrias tendem à forma parabólica.

Carvalho (1998), analisando o efeito da variação espacial e temporal do tempo de aplicação no desempenho do sistema de irrigação por sulcos, constatou um efeito significativo das variações do tempo de aplicação no desempenho do sistema de irrigação por sulco. Ao longo do tempo e do espaço, os valores máximos e mínimos da eficiência de aplicação, da taxa de escoamento e da taxa de percolação obtida pelo autor foram respectivamente, 33,1 e 95,3%, 0 e 61,3%, e 0,1 e 66,4%, mostrando grandes variações espaciais e temporais ao longo da estação de cultivo. Carvalho et al. (1999) constataram, acentuada desuniformidade no desempenho do sistema de irrigação por sulco principalmente ao longo da área irrigada demonstrando, desta forma, a complexidade do manejo do sistema e a importância de se fazer um monitoramento sistemático, tanto ao longo do tempo como do espaço, das variações nos parâmetros de campo e operacionais, visando-se estabelecer melhor controle do desempenho e seu diagnóstico o mais representativo possível das condições globais de campo.

Carvalho et al. (1998a) quantificando as variações espaciais e temporais da velocidade de infiltração básica num solo franco-arenoso, e verificando seus efeitos na estimativa da infiltração acumulada. Detectaram variações acentuadas da velocidade de infiltração básica que influenciaram consideravelmente na estimativa da infiltração acumulada. Segundo os autores essas variações afetaram sensivelmente a estimativa da

infiltração. Carvalho et al (1998b) também estudaram o efeito da variabilidade espacial e temporal de k e a da equação de Kostiakov-Lewis, na estimativa da infiltração acumulada, observaram elevadas variações nos valores desses coeficientes (k e a), que afetaram sensivelmente a estimativa da infiltração acumulada, evidenciando, assim, a importância de se realizar um monitoramento espacial e temporal desses parâmetros, tendo em vista um alto nível de desempenho dos sistemas de irrigação por sulco. Carvalho et al. (1998c) constaram grandes variações espaciais e temporais no desempenho do sistema de irrigação por sulco, segundo esses autores essas variações foram consequência de variações nos parâmetros de campo e operacionais, como também das necessidades hídricas da cultura ao longo de sua estação de cultivo. As perdas por escoamento apresentam um potencial de contribuição às essas variações bem maiores que as perdas por percolação.

Carvalho et al. (1999) avaliaram o grau de desuniformidade no desempenho de um sistema de irrigação por sulco, decorrente das variações espacial e temporal em parâmetros de campo e operacional e observaram variações espaciais máximas, ao longo da estação de cultivo, iguais a 33,0, 162,0 e 140,5%, respectivamente, na eficiência de aplicação, na taxa de escoamento e na taxa de percolação, enquanto espacialmente as variações temporais máximas para esses parâmetros foram de 26,3, 78,4 e 233,3%, na eficiência de aplicação, na taxa de escoamento e na taxa de percolação; eles mostraram, também, acentuada desuniformidade no desempenho do sistema de irrigação por sulcos estudados, principalmente ao longo da área irrigada demonstrando, desta forma, a complexidade do manejo do sistema e a importância de se fazer um monitoramento sistemático, tanto ao longo do tempo como do espaço, das variações nos parâmetros de campo e operacionais, visando-se estabelecer melhor controle do desempenho e seu diagnóstico o mais representativo possível das condições globais de tempo.

De acordo com Carvalho et al. (2003) Apesar do método de irrigação por superfície ser o mais antigo e mais usado no mundo, em virtude de suas vantagens em comparação ao método pressurizado, este tem apresentado baixos índices de desempenho devido ao seu manejo inadequado como consequência de dificuldades no monitoramento das variações espacial e temporal nos parâmetros de campo. Os autores, pesquisando a variabilidade espacial e temporal da seção transversal de escoamento superficial em sulcos de irrigação, as variações máximas observadas, ao longo da estação de cultivo, na largura de topo, na largura a 50% da altura máxima, na largura da base e na altura máxima foram,

respectivamente, em termos espaciais iguais a 16,3, 18,7, 105,2 e 35,1%; e iguais a 11,4, 13,5, 38,0 e 23,7%, em termos temporais. Segundo os autores os resultados trazem à tona a importância de se conhecer as variações espacial e temporal nos parâmetros geométricos da seção transversal de escoamento superficial dos sulcos, tendo em vista um melhor dimensionamento e manejo desse sistema.

Carvalho et al. (2004), analisaram as variabilidades espaciais e temporais no tempo de avanço e no tempo de oportunidade de infiltração d'água e seus reflexos no tempo de aplicação d'água num sistema de irrigação por sulco com fluxo reduzido para um solo franco-arenoso. Realizando medições em seis sulcos em doze eventos de irrigação da estação de cultivo, observaram os tempos de avanço. Observando os tempos de avanço e de oportunidade de infiltração d'água no final da área irrigada em cada evento e em cada sulco ao longo do tempo, verificaram que a variação espacial no tempo de avanço foi mais expressiva que a variação temporal, enquanto no tempo de oportunidade de infiltração d'água ocorreu o inverso. De acordo com os autores a heterogeneidade das características de infiltração d'água, bem como da vazão, do perímetro molhado dos sulcos e da lâmina requerida ao longo do tempo e do espaço, afeta a otimização do tempo de aplicação d'água. Pordeus et al. (2003) analisando a viabilidade da equação do arco da parábola no cálculo do perímetro molhado na irrigação por sulco, segundo esses autores na irrigação por sulco, quando se utiliza a equação do arco da parábola para calcular o perímetro molhado, os valores estimados de avanço, recessão, lâmina d'água infiltrada e volume infiltrado, representam melhor as condições de campo se comparadas com as equações tradicionais de perímetro molhado, usadas na literatura.

Henrique et al. (1997) monitorando ao longo do tempo e do espaço as características geométricas da seção transversal de sulcos de um sistema de irrigação do Perímetro Irrigado de São Gonçalo, PB, num solo de textura franco-arenosa, observaram variações espaciais e temporais nas dimensões básicas da seção transversal ocorrendo, em geral, aumento nas larguras da base, do topo e a 50% da altura de topo acompanhado, no entanto, de diminuição nessa altura; devido a essas variações, a geometria do sulco tendeu a uma forma parabólica. Em estudo similar no mesmo perímetro irrigado mas num solo de classificação textural franco, Santana (1996) também identificaram variações tanto espaciais como temporais na seção transversal de escoamento superficial dos sulcos, cuja

base foi à dimensão, que se mostrou mais vulnerável a alterações ao longo da estação de cultivo, com uma variação de 63%.

Henrique (1996) realizou uma análise da irrigação por sulco, com o objetivo de estudar a influência dos parâmetros de campo no desempenho desse sistema. Seu estudo foi realizado a partir de dados de campo obtidos no perímetro irrigado de São Gonçalo-PB e dados utilizados por Walker & Humpherys (1983). Em sua análise, utilizaram-se os modelos computacionais SIRMOD (Utah State University, 1989) e SIRTOM (Azevedo, 1992). O autor constatou que, para as condições de campo estudadas, os parâmetros que mais afetam o desempenho do sistema são comprimento dos sulcos e infiltração da água no solo, demonstrando, então, a importância de se estabelecer relação entre vazão de entrada e comprimento de sulcos que forneçam grandezas adequadas desses parâmetros. Constatou-se que a taxa de percolação é muito mais afetada pelos parâmetros de campo que o escoamento superficial. Segundo o mesmo autor, pode-se observar a importância de se realizar um monitoramento sazonal da fase de avanço, tendo em vista ser esta fase o maior contribuinte para as perdas por percolação.

Santana et al. (1997), realizam um monitoramento sazonal da performance de um sistema de irrigação por sulco no perímetro irrigado de São Gonçalo-PB, os resultados da pesquisa identificaram variações tanto espacial como temporais na seção de fluxo dos sulcos. Segundo os autores, a base do sulco foi a dimensão que se mostrou mais vulnerável a alterações ao longo da estação de cultivo, com um percentual de variação de 63%. As fases de avanço refletiram variações apenas temporais nas características de infiltração do solo. Os autores concluíram que considerando que as variações, em geral, nos parâmetros de campo foram atenuadas a partir do quinto evento de irrigação e que a eficiência neste evento foi substancialmente melhorada e mantida praticamente constante no restante da estação de cultivo, para economizar tempo e dinheiro, recomenda-se que o monitoramento da performance do sistema seja feito até esse evento. No entanto, os resultados desta pesquisa carecem de confirmação de pesquisa futura.

Sousa et al. (1999) afirmaram que o solo é um corpo natural complexo e dinâmico, resultante da atuação conjunta de muitos fatores de formação, como clima, organismos vivos, material de origem, relevo e tempo. Dependendo da intensidade e da atuação ou da predominância de alguns desses fatores, são formados solos de diferentes características químicas e físicas. Beckett & Webster (1971), apud Sousa et al. (1999),

indicam as diferenças climáticas regionais como um dos fatores responsáveis pela variação dos solos e acrescentam, ainda, a ação do homem como fator de variabilidade, principalmente nas características químicas.

Sousa et al. (1999) avaliaram a variabilidade espacial das características físico-hídricas e de água disponível de um solo aluvial, para fins de manejo adequado da irrigação, e coletaram amostras de solo com estrutura deformada nas profundidades de 0 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m, através de análise sistemática, totalizando 90 pontos. Estes autores avaliaram a viabilidade média para as variáveis estudadas (percentagem de areia, silte e argila, capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e porcentagem de água disponível (AD)) e, constataram ainda, que a variável AD apresentou estrutura de variabilidade semelhante para as duas profundidades amostradas, o que permitiu se construir um semivariograma único com a média dos dados resultando, daí, um alcance de dependência espacial de 0,4 m; assim como constataram com o mapa de isolinhas, foi possível a definição de subáreas onde o manejo da irrigação pode ser orientado de conformidade com o grau de variabilidade de retenção de água, de maneira a se ter um desempenho satisfatório do sistema de irrigação, em atender às necessidades hídricas da cultura.

Conforme Rivera et al. (1995b), um grande problema no dimensionamento dos sistemas de irrigação por superfície é a dificuldade em caracterizar a infiltração do solo, tornando crítica a determinação da vazão de adução e o tempo de irrigação. De acordo com Walker & Skogerboe (1987) e Bautista & Wallander (1991), apud Rivera et al. (1995a), um ótimo dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação por superfície requerem o conhecimento detalhado das características de infiltração do campo.

2.3. Estratégia de manejo da vazão

Quanto à vazão aplicada por sulco, Bernardo (1995) afirma tratar-se de um dos fatores mais importantes para se obter irrigação eficiente, o que é reforçado por Bassett et al. (1983), os quais afirmaram, com base na análise de dados, que o desempenho da irrigação é completamente sensível à vazão utilizada.

No que se refere à vazão, a capacidade de um sulco depende da seção de escoamento e das suas características hidráulicas, levando-se em consideração a velocidade de avanço determinada pela declividade do sulco e a possibilidade de ocorrência de erosão

(Olitta, 1984). Segundo Daker (1988) é sempre conveniente se aplicar, de início, em cada sulco, a vazão máxima que não cause erosão, a fim de que a água alcance, o mais depressa possível, o final do sulco, umedecendo-o completamente.

Rezende et al. (1988) analisando duas práticas de manejo de irrigação, em que uma era a redução da vazão depois de encerrada a fase de avanço, e a outra a construção de diques de contenção na extremidade final do sulco, concluíram que em condições de dimensionamento inadequado as práticas de manejo introduzidas proporcionaram resultados de desempenho pouco expressivos; ficou evidenciado, também, que os efeitos favoráveis esperados em função da adoção de determinadas práticas de manejo, dependem acentuadamente das características de dimensionamento e operação prevaletentes. Segundo Vázquez (1996a), a irrigação contínua com sulcos fechados bem projetados permite obter-se eficiência de aplicação próximo a 90%.

Em irrigação por sulco com drenagem livre, quanto menor for a vazão maiores serão os riscos de perda por percolação e, quanto maior for a vazão, maiores serão os riscos de perda por escoamento no final do sulco. Bishop et al. (1981) recomendam a equação de Gardner modificada por Criddle para se encontrar a vazão máxima, em litros por segundo, da seguinte forma:

$$Q_{max} = 0,631/S_o \quad (2.1)$$

onde: S_o - declividade em porcentagem.

Algumas equações menos empíricas podem fornecer valores mais aproximados para a vazão máxima não erosiva como a apresentada por Hamad & Stringham (1978) descrita a seguir:

$$Q_{max} = \alpha S_o^\beta \quad (2.2)$$

onde: Q - vazão máxima não erosiva para cada sulco, $L s^{-1}$;

S_o - gradiente de declive da superfície na direção do escoamento em porcentagem; e

α e β - constantes empíricas dependentes do tipo de solo.

Walker & Skogerboe (1987) estudaram a vazão máxima não erosiva, em função de parâmetros obtidos a partir das dimensões do sulco e propuseram a seguinte equação:

$$Q_{m\acute{a}x} = \left[\left(\frac{V_{m\acute{a}x}^{\rho_2} \cdot n^2}{3600 \cdot S_0 \cdot \rho_1} \right)^{\frac{1}{\rho_2-2}} \right] \quad (2.3)$$

em que: $Q_{m\acute{a}x}$ - vazão máxima não erosiva, $m^3 \text{ min}^{-1}$;

$V_{m\acute{a}x}$ - velocidade máxima não erosiva, $m \text{ min}^{-1}$;

n - coeficiente de rugosidade de Manning, $m^{-1/3} \text{ s}$;

ρ_1 e ρ_2 - coeficientes adimensionais que expressam a geometria do sulco; e

S_0 - declividade do sulco, $m \text{ m}^{-1}$

Para reduzir as perdas por escoamento superficial, a vazão é reduzida ao mínimo requerido quando a água alcança o final do sulco. A vazão reduzida sob esta condição ideal deve corresponder a um valor que garanta uma infiltração tanto através do fundo do sulco como das paredes (Booher, 1974; Wilke & Smerdon, 1969, apud Rodriguez, 1989). No sentido de se garantir um certo volume de água armazenado no sulco, a vazão reduzida deve corresponder a uma taxa pelo menos superior à taxa de infiltração básica do solo. Walker & Skogerboe (1987) recomendam que a vazão reduzida corresponda a 10% desta taxa. Segundo Bernardo (1995), a ocorrência de baixa uniformidade de distribuição d'água pelo sistema de irrigação por sulcos, se deve ao uso de pequenas vazões que contribuem para uma infiltração excessiva no trecho inicial dos sulcos e uma infiltração deficitária no final.

Conforme Lal & Pandya (1970), em muitos sistemas de irrigação por sulcos, com pequena vazão, cuja irrigação se processa com pequeno ou nenhum runoff, o que acarretará grandes perdas por percolação profunda. Os autores afirmam, ainda, que o critério apresentado por Criddle et al. (1956), assumindo-se que a frente de avanço de água deve alcançar o final do sulco em um quarto do tempo requerido para se aplicar a lâmina de irrigação desejada, não considera nenhuma perda por runoff; entretanto, os sistemas de irrigação por sulcos são freqüentemente projetados com runoff.

De acordo com Carvalho et al. (2004), a vazão aplicada nos sulcos é um dos fatores que mais afetam a eficiência de aplicação e a uniformidade de distribuição d'água e, desta forma, a aplicação de uma vazão constante, que é a estratégia de manejo mais utilizada, oferece grandes riscos a esses dois aspectos de desempenho do sistema. A escolha de uma vazão muito grande provocaria fase de avanço rápida diminuindo,

conseqüentemente, as perdas por percolação profunda e a desuniformidade de distribuição d'água aumentando, porém, as perdas por escoamento superficial, enquanto a escolha de uma vazão muito pequena acontece o oposto.

Quando no sulco é aplicada uma quantidade de água inferior à necessária, ocorre perda no rendimento e, quando se aplica uma quantidade excessiva, pode-se promover desperdício de água e energia e carrear e lixiviar os nutrientes e o solo, causando erosão (Bowman 1991, apud Henrique 1996). O ideal será a escolha de uma vazão que contrabalance as perdas por percolação profunda e por escoamento superficial; neste caso, ter-se-á uma vazão considerada ótima, cujo desempenho do sistema de irrigação por sulcos apresente o melhor resultado de eficiência de aplicação e uniformidade de distribuição da água, mas garantindo a condição de irrigação adequada, isto é, uma eficiência de armazenamento de 100%.

Segundo Carvalho (1998), uma outra estratégia de manejo capaz de evitar os riscos de uma vazão constante, é se utilizar uma vazão máxima não erosiva durante a fase de avanço minimizando, assim, as perdas por percolação e, ao término desta fase, reduzir a vazão a um valor um pouco superior a capacidade de infiltração básica do solo para minimizar, também, as perdas por escoamento.

Vázquez (1996b) apresentou uma equação de regressão linear múltipla para se determinar o comprimento de sulco e a eficiência de aplicação da água com irrigação contínua (vazão constante) e com redução da metade da vazão quando a água atinge o final dos sulcos. De acordo com os dados obtidos nos 189 sulcos utilizados para determinação das equações de regressão, concluiu-se que o método de irrigação por sulco, com redução de vazão incrementa a eficiência de aplicação d'água em relação à irrigação com fluxo contínuo; portanto, recomenda-se empregar, em sulcos com declividade de 0,2 a 0,6%, vazão inicial de 1 a 1,3 L s⁻¹ em solos arenosos e francos argilosos, respectivamente, em que o coeficiente de rugosidade varia de 0,03 a 0,06. De preferência, o método de corte posterior deverá ser usado em sulcos longos (solos franco e franco-argilosos) com pequeno espaçamento e menor umidade inicial.

De acordo com Bernardo (1995), a vazão inicial deve ser a máxima não erosiva que o sulco pode conduzir e a vazão final deve ser a menor capaz de manter todo o comprimento do sulco com água, durante o tempo necessário para se aplicar a lâmina de irrigação no final dos sulcos.

Uma outra maneira de se aplicar água nos sulcos de irrigação é se utilizar vazões variadas durante a aplicação. Carvalho (1998) afirma que este controle deve ser feito por meio de estruturas medidoras de vazão e de controle da carga hidráulica, localizadas nos canais principais e de derivações. Segundo ele, tais estruturas são do tipo vertedor, calha e comporta.

Pereira et al. (1991) estudaram as características de avanço e infiltração da água em sulcos, com aplicação de vazão contínua e intermitente; testaram três vazões 0,4, 0,8 e 1,2 L s⁻¹ e três cíclicos de 20, 40 e 60 min, constataram que não houve diferença entre os tempos de avanço com irrigação contínua e intermitente para a vazão de 1,2 L s⁻¹ e que a velocidade de avanço aumentou para a vazão de 0,4 L s⁻¹, nos três tempos cíclicos, em relação ao escoamento contínuo e, para a vazão de 0,8 L s⁻¹, nos tempos cíclicos de 40 e 60 min.

Azevedo (1992) desenvolveu uma ferramenta (o modelo SIRTOM), que é apresentada também em Azevedo et al. (1997a e 1997b) capaz de determinar durante a fase de avanço, isto é, em tempo real, os parâmetros da equação de infiltração de Kostikov-Lewis e prognosticar se o avanço da água ao longo do sulco será muito mais rápido ou muito lento, ou até mesmo se não chegará ao final da área cultivada. Diagnosticado, então, o que acontecerá, a vazão poderá ser alterada, de forma a melhorar o desempenho do sistema de irrigação em qualquer evento. O modelo mostra que em um sulco de 403 m de comprimento uma vazão de 0,82 L s⁻¹ o fluxo não atingiria o final da área, avançando até 150 m com uma duração no tempo de avanço de 260 min, com uma vazão de 2,0 L s⁻¹, atingiu-se o final da área com um tempo de avanço de 340 min. O fluxo variável durante a fase de avanço se constitui numa filosofia inovadora de manejo da vazão introduzida por Azevedo (1992) e viabilizada através de sua ferramenta, que tem como outro benefício à determinação em tempo real, ou seja, durante qualquer evento de irrigação, do tempo de aplicação d'água na irrigação por sulco com fluxo constante ou variável.

Pérez et al. (1995) desenvolveram um sistema de controle da irrigação por sulcos em tempo real. Os parâmetros de infiltração da equação de Kostikov-Lewis são estimados da medida do tempo de avanço, usando o modelo chamado IPE (Infiltration Parameters Estimation). Esses pesquisadores usaram placas de sensores ao longo dos sulcos para detectar o tempo de avanço e recessão. Os dados obtidos dos sensores de sinais são transmitidos para um receptor que, por sua vez, são transmitidos para um notebook em

que as informações são processadas e a irrigação otimizada em tempo real. Este processo permite, também, ao produtor, melhorar o desempenho dos sistemas de irrigação por sulcos, elevando a sua eficiência a índices comparáveis aos métodos de irrigação pressurizados.

2.4. Modelos matemáticos de simulação

A irrigação por superfície é classificada, hidraulicamente, como um escoamento não permanente, não uniforme e espacialmente variado (Strelkoff & Katopodes, 1977). Durante o escoamento a infiltração varia com a distância e o tempo, resultando em um caso especial de escoamento instável gradualmente variado sob pressão atmosférica, muito parecido com o escoamento de água em canais, apresentado por Henderson (1966), Strelkoff (1970) e Chow (1986).

A hidráulica da irrigação por superfície tem sido abordada desde ao seu aspecto hidrodinâmico à simples ponderações feitas em balanços volumétricos. O aspecto hidrodinâmico considera duas equações diferenciais parciais de tipo hiperbólico, conhecidas como equações de Saint-Venant (Chen, 1966; Strelkoff, 1970). Essas equações são produto da representação matemática da conservação de massa (equações da continuidade) e de energia (equação do movimento), as quais são apresentadas a seguir.

As equações de Saint-Venant, adaptadas à irrigação por superfície não têm solução analítica, porém muitos pesquisadores têm aplicado, com sucesso, métodos numéricos, como diferenças finitas e elementos finitos, na solução das mencionadas equações. Assim sendo, nas últimas décadas, vários modelos matemáticos foram desenvolvidos para através deles, se simular e avaliar a irrigação por superfície, existindo um consenso de que esses modelos permitem uma análise rápida e econômica dos parâmetros necessários à elaboração do dimensionamento e ao manejo mais eficiente de sistemas de irrigação por superfície, principalmente nos de sulcos e faixas. Referidas aproximações foram inicialmente aplicadas em sistemas de irrigação por faixas (Strelkoff, 1970; Kincaid et al., 1972; Sakkas & Strelkoff, 1974; Bassett & Fitzsimmons, 1976, Katopodes & Strelkoff, 1977 e Fonken et al., 1980); posteriormente, os esforços foram direcionados no desenvolvimento de técnicas hidrodinâmicas, utilizando-se um volume de controle deformável, para modelar a irrigação por superfície (Walker & Skogerboe, 1987).

A aplicação a partir da década de setenta das equações de Saint-Venant na irrigação por superfície, tem conduzido a modelos matemáticos sofisticados, classificados como hidrodinâmico (Bassett, 1972; Kincaid et al., 1972 e Katopodes & Strelkoff, 1977), zero-inércia (Strelkoff & Katopodes 1977; Elliott et al., 1982 e Shafique, 1984) e ondas cinemáticas (Chen, 1970 e Walker & Humpherys, 1983). Entretanto, deve-se mencionar que bem antes e até mesmo após o surgimento dos modelos, baseados nas equações de Saint-Venant, foram desenvolvidos modelos baseados simplesmente em balanços de volume, nos quais foram feitas hipóteses grosseiras sobre a dinâmica do perfil superficial de fluxo (Lewis & Milne 1938, Hall 1956, Chirstiansen et al., 1966 e Hart et al. 1968). Nos dias de hoje, os modelos baseados nas equações de Saint-Venant são mais preferidos, devido à sua maior precisão e à disponibilidade de micro computadores mais potentes; entretanto antes do surgimento desses modelos, os baseados em balanço de volume foram extensivamente utilizados no dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação por superfície.

O modelo hidrodinâmico consiste na solução completa das equações de Saint-Venant, apresentadas a seguir:

Equação da continuidade

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (2.4)$$

Equação do movimento

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = S_o - S_f + \frac{vI}{Ag} \quad (2.5)$$

em que: A - área da seção transversal, m^2 ;

Q - vazão, $m^3 s^{-1}$;

t - tempo decorrido, segundo;

x - distância de avanço da água no campo, m;

τ - tempo de oportunidade de infiltração, segundo;

g - aceleração da gravidade, $9,81 m s^{-2}$;

y - altura de fluxo, m;

S_o - declividade do campo, $m m^{-1}$;

S_f - declividade da linha de energia, $m m^{-1}$;

- I - taxa de infiltração, $m s^{-1}$;
 Z - lâmina acumulada, m ; e
 v - velocidade do fluxo, $m s^{-1}$.

A equação do movimento indica como a altura de fluxo (y) varia com a distância e o tempo, isto é, descreve a dinâmica da forma do perfil superficial de água e, conseqüentemente, volume de água armazenado na superfície do solo.

O modelo zero-inércia utiliza também as equações de Saint-Venant, mas negligencia os termos inerciais da equação do movimento, ficando esta equação apenas na forma:

Equação da continuidade

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (2.6)$$

Equação do movimento

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (2.7)$$

O modelo de zero-inércia é produto de uma simplificação do modelo hidrodinâmico. Considerando as pequenas velocidades do escoamento que prevalecem nas faixas de infiltração, Strelkoff & Katopodes (1977) assumiram que, nessas condições, o número de Froude é geralmente pequeno, menor que 0,2, podendo ser considerado nulo; partindo desta hipótese, os autores desconsideraram os termos da infiltração dinâmica e inercial da equação do movimento, sem comprometer o nível de precisão; assim, propôs-se o modelo de zero-inércia, também conhecido como modelo de equilíbrio, em virtude das suas simplificações na equação de conservação do movimento, implicando no fato de que o escoamento superficial pode ser modelado como escoamento permanente e não uniforme, passando suas equações a serem parabólicas, facilitando a solução numérica. Com base na semelhança de escoamento, esta hipótese é assumida como válida também para irrigação por sulcos; conseqüentemente, os termos representando a inércia (aceleração local e covectiva), devido aos efeitos da infiltração dentro da equação de conservação da energia, são desconsiderados (Elliott et al., 1982 e Scaloppi, 1983).

O modelo de ondas cinemáticas conhecido, também, como modelo de escoamento uniforme, faz maiores simplificações que o modelo zero-inércia. O modelo

baseia-se na solução da equação de continuidade e utiliza, no lugar da equação do movimento, uma relação de igualdade entre o gradiente da superfície do escoamento e o da linha de energia. Geralmente esta relação é substituída por uma equação de escoamento uniforme, como a fórmula de Manning ou a de Chezy (Walker & Skogerboe, 1987). Estas simplificações permitem que a programação computacional do modelo seja muito mais simples que nos modelos hidrodinâmicos e zero-inércia (Azevedo, 1992).

No modelo de ondas cinemáticas a equação do movimento é substituída pela equação de Manning que é usada em regime de fluxo uniforme em escoamento com superfície livre. Essa consideração viabiliza o emprego da equação da continuidade, visto que neste modelo é negligenciada a equação do movimento, o que a tornaria sua solução indeterminada no termo $\partial A/\partial t$. Assume-se, como nova hipótese, que existe uma relação única que descreve vazão como função da altura de fluxo de fluxo. No entanto, para reduzir o número de incógnitas, utiliza-se função potencial que descrevem adequadamente relação entre altura de fluxo-área e, seção hidráulica-área, a exemplo do que foi considerado no modelo zero-inércia.

O modelo de ondas cinemáticas utiliza a equação da continuidade, mas negligencia completamente a equação do movimento, sendo, então, a dinâmica do perfil superficial de fluxo descrita pela equação de Manning, apresentada a seguir:

Equação da continuidade

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (2.8)$$

Equação da Manning

$$Q = \frac{S_o^{\frac{1}{2}}}{n} A \cdot R^{\frac{2}{3}} \quad (2.9)$$

em que: Q - vazão na seção estudada, $m^3 s^{-1}$;

S_o - declividade do sulco, $m m^{-1}$;

n - coeficiente de rugosidade de Manning, $m^{-1/3} s$;

R - raio hidráulico, m ;

A - área da seção transversal do sulco, m^2 , função da altura de fluxo $A = \sigma_1 \cdot y^{\sigma_2}$.

onde: σ_1 e σ_2 são parâmetros empíricos que dependem da forma do sulco, adimensional;
 y - altura de fluxo, m.

Kruger & Bassett (1965), utilizando diferenças finitas, resolveram o modelo hidrodinâmico para a fase de avanço da irrigação por faixas; eles assumiram uma taxa de infiltração constante ao longo da superfície irrigada; mais tarde, Wilke (1968) estudou a hidrodinâmica do escoamento da irrigação por sulcos, aplicando o método das características para transformar as equações diferenciais parciais que governam o escoamento, em equações diferenciais ordinárias e utilizou a técnica das diferenças finitas na solução dessas últimas, porém o perfil do escoamento obtido pela metodologia proposta pelo autor não foi muito preciso como consequência dos problemas associados à determinação da velocidade e da altura de fluxo, na proximidade da frente de avanço.

Bassett (1972) e Kincaid et al. (1972), apresentaram uma aproximação hidrodinâmica, considerando todas as fases da irrigação por faixas, e resolvendo as equações que governam o processo de irrigação através do método das características, utilizando um sistema de malhas retangulares. Dentro do modelo a infiltração foi descrita pela função de Kostiakov (Elliott & Walker, 1982).

Katopodes & Strelkoff (1977) propuseram um modelo hidrodinâmico completo, isto é, representando todas as fases da irrigação por faixas. Segundo Souza (1981), a análise da irrigação por sulco é mais difícil do que a da irrigação por faixas, devido à complexidade introduzida pela forma de sulco e suas relações com a taxa de infiltração. Sakkas & Strelkoff (1974), partindo das equações de Saint-Venant, derivaram quatro equações características, que foram integradas através de um sistema de malha irregular no plano $x-t$, com aproximação euleriana. Bassett & Fitzsimmons (1976) e Katopodes & Strelkoff (1977) utilizaram técnicas similares mas com um sistema de malha retangular, isto é, regular, para resolver todo o processo da irrigação por faixas, partindo das equações de Saint-Venant; posteriormente, Fonken et al. (1980) apresentaram uma técnica de solução diferente para o modelo hidrodinâmico, simulando todas as fases da irrigação por faixas. Um esquema de diferenças finitas foi considerado e as soluções foram obtidas por um procedimento numérico iterativo.

Fazendo uso de um sistema de aproximação de células deformáveis, Souza (1981) foi o primeiro a desenvolver um modelo hidrodinâmico para a irrigação por sulcos, com a simulação de todas as suas fases. Em sua solução, este autor consegue expressar a

geometria do sulco por meio de uma relação empírica de potência e os resultados da simulação foram satisfatórios quando comparados com dados de campo correspondentes a sulcos curtos. Haie (1984) encontrou discrepâncias sérias na simulação da recessão de sulcos mais compridos. Segundo este autor, os modelos hidrodinâmicos são complexos e caros mas, por outro lado, são importantes porque estabelecem um padrão de comparação para os modelos mais simples.

Conforme Bassett & Fitzsimmons (1976) e Katopodes & Strelkoff, (1977), os modelos hidrodinâmicos dependem de extensiva e complicada programação computacional, embora os parâmetros requeridos, revelam em geral, acentuada interdependência e diferentes graus de variabilidade espacial. Outros parâmetros são reconhecidamente variáveis com o tempo enquanto certos processos, são relativamente complexos para serem representados por uma única equação durante todo um evento de irrigação. Considerando-se todos esses fatores, torna-se difícil justificar o uso de modelos hidrodinâmicos completos para o uso rotineiro do dimensionamento e avaliação de sistemas de irrigação por superfície, porém esses modelos podem ser usados na avaliação de modelos mais simples, em que um modelo hidrodinâmico seria considerado padrão.

O modelo hidrodinâmico é um padrão mundial em simulação de irrigação por superfície e está preparado para simular as condições de irrigação por inundação, faixas e sulcos, em uma grande diversidade de condições de campo.

A Resolução do modelo de ondas cinemáticas tem sido obtida utilizando aproximações implícitas e explícitas com diferenças finitas. A solução implícita com diferenças finitas, está baseada na movimentação de um volume de controle, seguindo um esquema parecido ao utilizado na solução do modelo de zero-inércia, onde é utilizada uma malha retangular (sistema euleriano) e, ao invés de linearizar as equações, utiliza o método iterativo Newton-Raphson para resolver o conjunto de equações algébricas não lineares (Walker & Skogerboe, 1987); de outro lado, a solução explícita com diferenças finitas, envolve um esquema cujas equações são linearizadas, utilizando células computacionais deformáveis, de preferência oblíquas, na direção do escoamento, sistema lagrangeano (Wallender, 1986; Wallender & Yokokura, 1991).

Bassett et al. (1983), afirmaram que todos os modelos matemáticos do processo da irrigação superficial utilizam o balanço de volume ou a equação da continuidade, e diferem um do outro, principalmente na escolha da equação de movimento.

Um modelo hidrodinâmico do avanço da água em faixa de irrigação foi apresentado por Bassett (1972), que o estendeu para todas as demais fases da irrigação.

Walker & Skogerboe (1987) descreve a solução numérica espacial para os modelos hidrodinâmico, zero-inércia e ondas cinemáticas onde as equações são integradas no plano $x-t$, expressando valores conhecidos na linha de tempo t_{i-1} e valores desconhecidos na linha t_i . Considerável atenção tem sido dada à fase de avanço na irrigação por superfície, devido à sua influência no tempo de oportunidade de infiltração ao longo da parcela irrigada, razão por que, tanto o dimensionamento como o manejo dessa modalidade de irrigação devem objetivar uma diminuição na duração dessa fase, de maneira que as perdas por percolação sejam reduzidas e uma melhor uniformidade de distribuição d'água seja alcançada (Bishop et al., 1981). De acordo com Scaloppi (1983), o principal problema associado ao dimensionamento da irrigação por sulcos, consiste na previsão do avanço e da recessão da água na superfície do solo. Segundo (Scaloppi, 1995), em inúmeras situações de interesse prático, é preferível se fixar o intervalo de distância dos pontos onde as equações diferenciais que regem o escoamento superficial são solucionadas, ao invés de se fixar os intervalos de tempo. A solução numérica temporal das equações de Saint-Venant, durante a fase de avanço, tem como incógnita no contorno à jusante móvel, o tempo para a frente de avanço percorrer o intervalo de distância estabelecido na célula final da grade computacional.

A irrigação por superfície, principalmente por sulco, está sujeita a variações dos parâmetros hidráulicos do solo. Desde o preparo da área para o plantio até o período de colheita, as características físicas do solo passam por várias transformações. De um evento de irrigação para outro, o tempo de avanço da água no sulco muda, em virtude das mudanças ocorridas na rugosidade, forma do sulco e, sobretudo nas características de infiltração da água no solo. Desta forma, um manejo adequado do sistema de irrigação, deve levar em conta essas variações, de maneira que em cada evento de irrigação sejam feitos ajustes nos parâmetros operacionais (vazão e tempo de aplicação d'água), objetivando-se um melhor desempenho do sistema.

De acordo com Garrido (1992), os fatores que contribuem para a baixa eficiência de aplicação de irrigação por sulco, são: a diferença no tempo de oportunidade para infiltração da água ao longo do sulco, a variabilidade espacial e temporal nas características de infiltração e o manejo inadequado.

2.5. Limitações de uso dos modelos matemáticos

A solução das equações completas é a que se chama enfoque hidrodinâmico. Este é o caso mais complicado e, tradicionalmente se tem evitado sua solução devido a sua elevada necessidade de velocidade de cálculo e de memória no computador. Isto já não é nenhuma limitação para os computadores pessoais de hoje em dia, que podem resolver estes problemas em tempo reduzido, até frações de segundo.

De acordo com Clemmens (1979), os resultados do modelo de zero-inércia têm sido satisfatórios quando comparados com os observados no campo tanto em irrigação por faixas, como por sulco. Para a simulação da irrigação por sulco, com o modelo zero-inércia são vários os trabalhos apresentados. Elliott et al. (1982), utilizando uma técnica para linearizar a equação da continuidade, conseguiu simular a fase de avanço, com resultados bastante satisfatórios.

Em termos gerais, sob a maioria das condições do escoamento em irrigação por superfície, o modelo zero inércia apresenta erros desprezíveis quando comparado com modelos hidrodinâmicos ou mesmo com dados de campo.

O modelo de ondas cinemáticas não é aplicável a parcelas horizontais. Na realidade, a sua precisão diminuirá quando S_0 se aproxima de zero. Strelkoff & Katopodes (1977), acham que ele simula as condições do escoamento tanto melhor quanto maior for a declividade longitudinal. Walker & Skogerboe (1987) referem que este tipo de modelo não simula bem a fase de recessão.

Analisando os diferentes modelos (hidrodinâmico, zero-inércia e ondas-cinemáticas), Walker & Humpherys (1983) encontraram, com diferentes gradientes ou declividades da superfície de escoamento (entre 0,0025 e 0,0104 $m\ m^{-1}$), que a sofisticação dos modelos hidrodinâmico e zero-inércia para esta faixa de condições da declividade do campo, era desnecessária para irrigação por sulcos. Reddell (1981), também achou que as diferenças entre as aproximações dos modelos zero-inércia e ondas cinemáticas na simulação da irrigação por sulcos, são desprezíveis, porém em situações com declividades menores a 0,001 $m\ m^{-1}$, os erros podem ser significativos quando se simula a fase do avanço com o modelo de ondas cinemáticas.

2.6. Softwares da irrigação superficial

Azevedo (1992), utilizando o modelo matemático de ondas cinemáticas, desenvolveu o modelo SIRTOM (Surface Irrigation Real-Time Optimization Model) que é um sistema de checagem e controle capaz de prever as características de infiltração durante a fase de avanço e promover ajustes, em tempo real, na operação do evento de irrigação, melhorando o desempenho do sistema.

Azevedo (1992) desenvolveu um modelo matemático computacional de ondas cinemáticas para interagir num processo de otimização não-linear na solução do problema inverso da irrigação por sulco, que consiste na determinação das características de infiltração d'água no solo, a partir do ajuste do avanço simulado ao medido em campo. Este modelo simula a fase de avanço para diferentes combinações entre os parâmetros de Kostiakov-Lewis, buscando minimizar as discrepâncias entre os tempos de avanço simulado e o medido, e faz parte de um programa computacional denominado SIRTOM desenvolvido para solucionar o problema inverso.

Segundo Azevedo et al. (1997b), as análises desenvolvidas com este modelo demonstraram sua viabilidade na solução de problema inverso, uma vez que, para todas as condições de campo estudadas, elas interagiram satisfatoriamente no processo de ajustagem; constataram também que a solução do problema inverso da irrigação por sulco é possível, mesmo durante estágios iniciais da fase de avanço, fato este que viabiliza, ao modelo, fazer diagnósticos do desempenho do sistema de irrigação e sugerir, ao irrigante, alternativas para aprimora-las em tempo real.

Segundo Playán & Faci (2001), um exemplo de modelo unidimensional completo é o SIRMOD (Surface Irrigation Simulation Software), Walker, (2001), que resolve as equações hidrodinâmicas unidimensionais da irrigação por superfície, mediante o método do volume de controle deformado. O SIRMOD permite que as simulações sejam feitas pelo modelo de ondas cinemáticas, de zero-inércia e hidrodinâmico.

Camacho et al. (1996) apresentaram uma técnica matemática de otimização para resolver o problema inverso do avanço e da infiltração na irrigação por gravidade, utilizando um enfoque cinemático para sua simulação. A partir de dados de campo do avanço, estimaram os parâmetros de infiltração de Green Ampt em nível de parcela. Os autores dizem que elevada potência de cálculos dos computadores pessoais e o baixo custo

deles permitem considerar-se a utilização em tempo real do modelo cinemático para projetar e avaliar as eficiências hidráulicas dos sistemas de irrigação por gravidade.

Marques & Botrel (2000) utilizando o método da análise de regressão apresentado por Bernardo (1995) para os dados de campo e a análise de regressão descrita por Olitta (1984), desenvolveram um software denominado sulco 2000, para Windows 95 em Delphi 3.0, que auxilia na elaboração de projetos de irrigação por sulcos por meio de procedimentos de cálculos, automáticos agilizando testar várias situações durante a fase do projeto. O software permite a obtenção das equações de infiltração e de avanço.

Vázquez (1996a) apresentou um método simplificado para determinar o vazão ótima de água e o tempo de irrigação para aplicar uma vazão contínua em sulcos fechados, cujos dados utilizados foram tempo de avanço da água, geometria do sulco, umidade inicial do solo, lâminas a serem aplicadas e coeficiente de rugosidade de Manning. As ferramentas de cálculo foram duas equações de regressão linear múltipla, constatando ser necessário aplicar uma primeira irrigação para possibilitar a medição da duração do avanço no primeiro evento de irrigação com uma vazão dentro do intervalo de $0,75Q_o$ a $1,25Q_o$, donde Q_o é a vazão ótima. No caso da vazão ser maior que a ótima, não deve haver transbordamento dos sulcos, além de cumprir os intervalos dados para as variáveis S_o , n , w , Z_m e D_s . As equações propostas são as seguintes:

equação para a vazão,

$$Q_o = \left(\frac{Ls}{33,547} \right) \left(\frac{n Z_m D_s}{t_a} \right)^{0,668} \left(\frac{w}{S_o} \right)^{-0,199} \quad (2.10)$$

em que: Q_o – vazão em $L s^{-1}$

Ls – comprimento do sulco, m;

t_a – tempo de avanço da água, min;

S_o – declividade do sulco em percentagem;

n – coeficiente de rugosidade de Manning, $m^{-1/3} s$;

w – umidade inicial do solo, cm;

Z_m – Lâmina infiltrada média, cm; e

D_s – espaçamento entre sulcos, cm.

e equação para o tempo de irrigação,

$$Tr = \left(\frac{Ls D_s}{652,926 Q_o} \right) Z_m^{0,979} t_a^{0,042} \quad (2.11)$$

em que: Tr – tempo de irrigação, min;

Q_o – vazão em $L s^{-1}$

Ls – comprimento do sulco, m;

t_a – tempo de avanço da água, min;

Z_m – Lâmina infiltrada média, cm; e

D_s – espaçamento entre sulcos, cm.

A fase de avanço torna-se difícil de ser simulada em razão da natureza do escoamento da água na superfície do solo, classificado-o como não permanente, não uniforme e espacialmente variado, diminuindo a vazão com a distância, em virtude da infiltração (Tabuada, 1989). Segundo Valiantzas (1999), o problema do avanço em sulcos está na forma do dimensionamento, que é resolvido numericamente para vários valores de parâmetros de infiltração.

Levien (1985) desenvolveu um modelo algébrico que simula o processo completo da irrigação por sulco, o qual pode ser usado para analisar e prever o desempenho de um sistema de irrigação por sulco em declive com descarga livre. O autor utilizou a equação da conservação da massa com a hipótese básica de que a lâmina de irrigação é a lâmina de fluxo normal na cabeceira do sulco e cujo modelo foi comparado com o modelo hidrodinâmico desenvolvido por Souza (1981); foi verificado, então, pequena diferença nos resultados obtidos.

Com base na solução da equação de volume, Levien (1998) desenvolveu um modelo algébrico que simula o processo completo da irrigação por sulco em declive e contempla os casos de sulco com escoamento livre, sulcos bloqueados no final, irrigação com fluxo constante, irrigação com redução de vazão e irrigação com fluxo pulsante. Este modelo pode ser usado para analisar e prever o comportamento da irrigação.

Levien & Camacho (2000) utilizaram o modelo matemático desenvolvido por Levien (1998), com base na solução da equação de balanço de volume, para analisar a irrigação contínua por sulco em declive e bloqueado no final da área. Os resultados da simulação realizada com o modelo do balanço de volume foram comparados com os resultados da simulação feita com o modelo SRFR, desenvolvido por Strelkoff (1990),

demonstrando a confiabilidade da utilização do modelo para analisar o comportamento da irrigação por sulcos.

Carvalho et al. (1994), desenvolveram um programa computacional que simula as fases de avanço e recessão para a irrigação por superfície, com aplicação intermitente de água, e utilizaram o modelo zero-inércia. Os resultados possibilitaram constatar que, ao simular a fase de avanço na irrigação com aplicação intermitente, as diferenças entre os dados de campo e os dados pelo modelo, foram pequenas. Segundo esses autores, a fase de avanço da água na irrigação por superfície está diretamente relacionada à infiltração de água no solo. Para irrigação com aplicação intermitente de água, a fase de avanço é representada por várias equações, em razão dos diversos fenômenos que afetam a velocidade de infiltração da água no solo.

Rivera et al. (1995a) realizaram a simulação da irrigação por sulco (convencional, com redução da vazão e com reuso da água de escoamento), através do modelo de balanço de volume, e mostraram que esse modelo gera boa aproximação sobre o que ocorre no campo. Concluíram ainda, que o sistema com reuso de água produz melhores performances, especialmente em solos de textura média a fina.

Segundo Andrade et al. (1998), a utilização de modelos matemáticos para previsão da irrigação superficial constitui recursos valiosos, capazes de levar em conta inúmeras alternativas de dimensionamento a um custo e tempo reduzidos; além disso, desenvolveram um modelo matemático simplificado para simular a fase de avanço na irrigação por sulco, utilizando células de espaço prefixadas e rugosidade variável. Conforme os autores, o modelo de simulação mostrou-se com baixo nível de complexidade e os resultados obtidos apresentaram boa relação com os dados conseguidos em nível de campo, qualificando-o como ferramenta útil e eficaz de ajuda para o dimensionamento da irrigação por sulco.

Segundo Serralheiro (1996), o modelo SRFR, foi e continua ser desenvolvido por uma equipe de pesquisadores do USDA – Agricultural Research Service, U.S. Water Conservation Laboratory, Phoenix, Arizona (Streekoff, 1990; Clemmens et al., 1995). Tem detalhes de apresentação (formas de gráficos e informação nele contida, unidades, etc.) mais complexos que os do SIRMOD, com mais possibilidades de escolha pelo usuário. Pode também o modelo simular o “surge flow” e o “cut-back”, neste

caso fica a critério do usuário a decisão não só quanto ao coeficiente de redução mas também quanto ao momento oportuno de a realizar.

Strelkoff et al. (1996) apud Serralheiro (1996), apresentaram uma nova versão do modelo BORDER, cuja versão experimental estava há alguns anos a ser usada. É um programa destinado ao dimensionamento das faixas inclinadas. Nos fundamentos e em vários aspectos da funcionalidade é muito semelhante ao SRFR, diferindo naturalmente em aspectos específicos das faixas, ambas mais simples que nos sulcos.

Clemmens et al. (1995) desenvolveram o modelo BASIN, que é uma nova versão de um programa que estava a ser usado experimentalmente há alguns anos, feito pela mesma equipe dos modelos SRFR e BORDER (Strelkoff, 1990 e Strelkoff et al., 1996). O BASIN é, porém, bastante mais simples que os dois, o que aliás está de acordo com o seu objetivo, que é o dimensionamento de tabuleiro (de nível). Como “input” o programa requer uma equação da infiltração (ou a “família de infiltração” do SCS), a vazão disponível e a lâmina d’água requerida, bem como as dimensões (comprimento e largura) do tabuleiro. Como “output”, fornece o tempo de aplicação e de avanço e os parâmetros de avaliação da irrigação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Desenvolvimento teórico do modelo de ondas cinemáticas

3.1.1. Equações básicas do modelo de ondas cinemáticas

No modelo de ondas cinemáticas utilizada nesta pesquisa assume-se que não existe variação da altura de fluxo com a distância, isto é, $\partial y/\partial x = 0$ negligenciando-se completamente a equação do movimento, sem a qual nada pode ser dito com respeito à dinâmica da forma do perfil superficial de fluxo, ficando a equação da continuidade indeterminada no termo $\partial A/\partial t$; para solucionar este problema assume-se que existe uma relação única que descreve vazão como função da área de fluxo; substitui-se, então a equação do movimento pela Equação de Manning. O escoamento, estudado apenas cinematicamente, assemelha-se à propagação de uma onda cinemática que entra em colisão, razão por que esses modelos se designam de ondas cinemáticas. A designação de modelos de escoamento uniforme, também usada, deve-se, como é óbvio, à fundamentação numa equação própria de escoamento uniforme.

Assim sendo, as equações que constituem o modelo de ondas cinemáticas passam a ser:

Equação da continuidade

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (3.1)$$

$$A = \sqrt{\frac{Q^2 n^2}{S_0 R^{4/3}}} \quad (\text{Equação de Manning}) \quad (3.2)$$

em que: A - área da seção transversal do fluxo, m^2 ;

t - tempo de ocorrência, segundo;

x - distância de avanço da água no campo, m ;

τ - tempo de oportunidade de infiltração, segundo;

Z - volume infiltrado acumulado por unidade de comprimento de sulco, $m^3 m^{-1}$;

Q - vazão de descarga, $m^3 s^{-1}$;

n - coeficiente de rugosidade de Manning, $m^{-1/3} s$

S_0 - declividade do campo, $m m^{-1}$; e

R - raio hidráulico, m ;

A equação de Manning foi utilizada, nesta análise, para gerar relação única entre vazão e seção hidráulica. Elliott et al. (1982) propuseram uma relação empírica para a seção hidráulica dada por:

$$y = \sigma_1 A^{\sigma_2} \quad (3.3)$$

$$e \quad A^2 R^{1,33} = \rho_1 A^{\rho_2} \quad (3.4)$$

onde: y - altura de fluxo no sulco, m ;

A - área da seção transversal do escoamento, m^2 ;

R - respectivo raio hidráulico, m ; e

σ_1 , σ_2 , ρ_1 e ρ_2 - parâmetros empíricos que dependem da forma do sulco.

Os parâmetros geométricos empíricos σ_1 , σ_2 , ρ_1 , e ρ_2 , são considerados constantes para um sulco prismático (não variam ao longo do comprimento do sulco nem no tempo); isto é válido para um evento de irrigação, pois seus valores podem mudar entre uma irrigação a outra.

A hipótese descrita assume que as funções potenciais descrevem adequadamente relações entre altura de fluxo, área, largura da superfície livre d'água, raio hidráulico etc. Da equação de Manning e atendendo à Equação 3.4, chega-se a:

$$S_0 = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{1,33}} = \frac{Q^2 n^2}{\rho_1 A^{\rho_2}} \quad (3.5)$$

em que: Q é a descarga de fluxo em $m^3 s^{-1}$; n é o coeficiente de Manning em $m^{-1/3} s$; e S_o é declividade média do sulco em $m m^{-1}$, de onde se tira Q cuja derivada, em conjunto com a equação da infiltração, se substitui em (3.1), seguindo-se uma cadeia de transformações que, compõem, afinal, o desenvolvimento do modelo (Walker & Humpherys, 1983).

Em virtude das Equações 3.2 e 3.5, este tipo de modelo não é aplicável a sulcos quando a declividade é muito pequena, ou seja, quando a declividade tende a zero; na realidade, sua precisão diminuirá quando S_o se aproximar de zero. Strelkoff & Katopodes (1977) acharam que ele simula melhor as condições de escoamento quanto maior for a declividade longitudinal. Walker & Skogerboe (1987) referem que este tipo de modelo não simula bem a fase de recessão.

Usando-se a relação da Equação 3.3, a equação de Manning se torna:

$$Q = \alpha A^m \quad (3.6)$$

em que:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\rho_1 S_o}}{n} \quad (3.7)$$

$$m = \frac{\rho_2}{2} \quad (3.8)$$

sendo n o coeficiente de rugosidade de Manning em $m^{-1/3} s$, S_o a declividade do sulco em $m m^{-1}$ e ρ_1 e ρ_2 são constantes empíricas ajustadas às medições de campo atuais da geometria do sulco; α e m constantes empíricas.

3.1.2 Solução numérica do modelo

A solução numérica das equações de Saint-Venant baseia-se no conceito do controle de volume constituído de células individuais deformáveis, descrevendo o perfil superficial de fluxo num evento de irrigação. A deformação mais acentuada do perfil superficial de fluxo ocorre nas regiões de contorno do sistema. A solução destas equações pode ser baseada considerando-se que a maior deformação ocorra na seção de entrada do fluxo ou, ainda, na seção de saída. Quando se baseia na maior deformação na seção de entrada, as células desenvolvem uma velocidade avante definindo, assim, um sistema Lagrangeano, ou seja, com células em movimento, havendo uma expansão das mesmas

tanto ao longo da distância como do tempo; enquanto considerando-se na seção de saída, as células tornam-se estacionárias, estabelecendo um sistema Euleriano, no qual a expansão das células ocorre apenas ao longo do tempo.

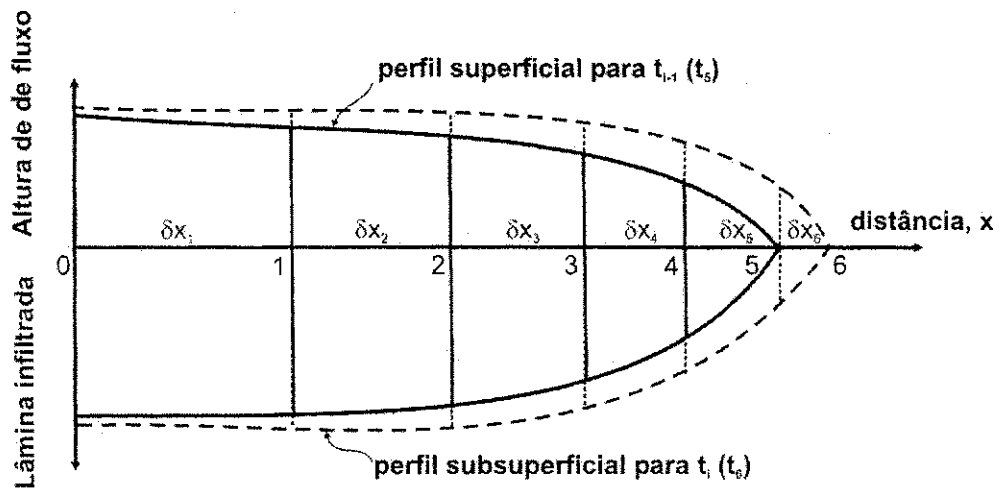
Para solução numérica espacial das equações do modelo de ondas cinemáticas, utilizou-se, nesta pesquisa, o procedimento de integração Euleriana com aproximação de primeira ordem, apresentado por Walker & Humpherys (1983) e Wallender (1986), o qual resulta em duas equações algébricas mais estáveis e mais fáceis de serem resolvidas em microcomputadores. Conceitualmente, a aproximação considera o perfil superficial e subsuperficial de água ao longo da porção da área umedecida durante etapas sequenciais de cálculo. A Figura 3.1 ilustra os perfis superficial e subsuperficial de fluxo nos tempos, t_{i-1} e t_i , identificando as células que compõem esses perfis. Durante cada etapa de cálculo, o fluxo d'água avança uma distância incremental, δx ; por exemplo, durante o primeiro intervalo de tempo (primeira etapa de cálculo), estende-se a uma distância δx_1 , no segundo intervalo de tempo a uma distância δx_2 , e assim sucessivamente, podendo-se generalizar para a distância da frente de avanço, x_i , no tempo t_i , da seguinte maneira:

$$x_i = \sum_{k=1}^i \delta x_k \quad (3.9)$$

em que δx_k é o k-ésimo incremento de espaço, definido pelo avanço durante o intervalo de tempo, quando $i = k$, onde k é número de incremento de tempo.

Uma célula típica do perfil é ilustrada na Figura 3.2, exibindo os perfis nas etapas de cálculo t_{i-1} e t_i . As anotações J, M, L e R são introduzidas em cada célula para identificar as variáveis que descrevem as condições de fluxo com relação ao tempo e ao espaço. Dessa maneira, as variáveis subscriptas por J ou M referem-se às condições de fluxo no tempo t_{i-1} e nas fronteiras à esquerda (montante) e à direita (jusante) da célula, respectivamente. Similarmente, L e R são subscriptos nas fronteiras à esquerda e à direita da célula no tempo t_i . Combinando as células de todos os incrementos de tempo juntas tem-se uma grade de cálculo no plano (x,t) , na qual as trajetórias de avanço e recessão podem ser traçadas (Figura 3.3). Observa-se neste plano que durante a fase de avanço as células são retangulares, exceto as da frente de avanço que são triangulares por não existir fluxo na fronteira à jusante destas células nos tempos t_i e t_{i-1} . Durante as fases de armazenamento e

depleção todas as células são retangulares, já durante a recessão a célula da extremidade à montante é triangular pelas mesmas razões do comportamento do fluxo na frente de avanço, mas as demais células são retangulares. A largura de cada célula é determinada pela distância da frente de avanço durante cada etapa de cálculo δt , que se torna, então, uma das incógnitas do problema, uma vez que se considerou δt constante; isto se chama uma solução espacial das equações de Saint-Venant, porque δx é uma incógnita, enquanto o valor de δt é definido pelo usuário do modelo.



FONTE : WALKER & SKOGERBOE (1987)

Figura 3.1. Esquema da progressão do fluxo superficial e da infiltração para intervalo de tempo constante

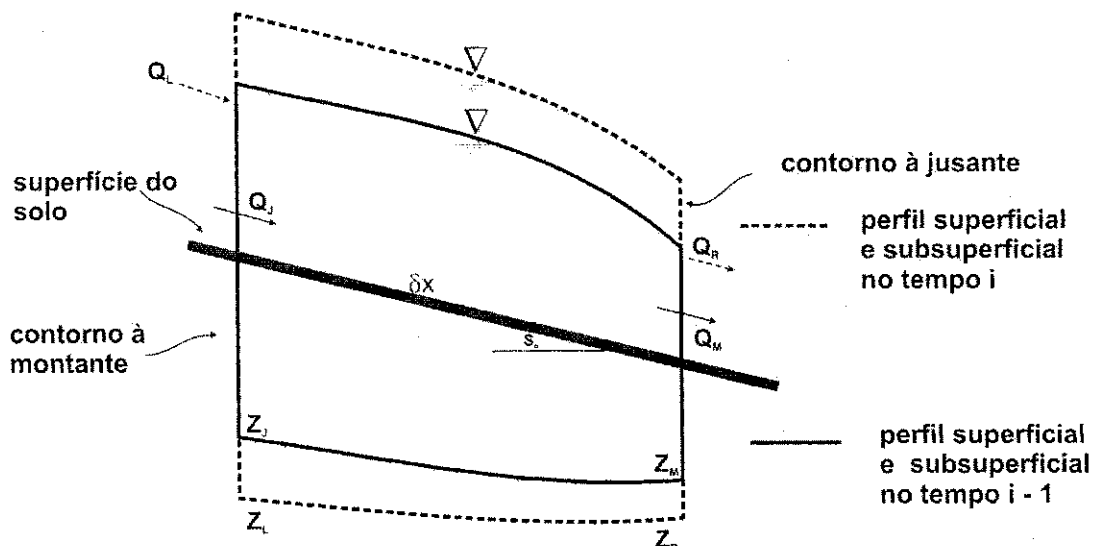


Figura 3.2. Célula deformada de fluxo (Walker & Skorgeboe, 1987)

Para obter-se a forma integrada da equação da continuidade (Equação 3.1), primeiro integra-se analiticamente com relação à distância e depois numericamente com relação ao tempo. Tem-se, então:

$$\int_x^{x+\delta x} \left(\int_t^{t+\delta t} \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) dt + \int_x^{x+\delta x} \left(\int_t^{t+\delta t} \frac{\partial A}{\partial t} dt \right) dx + \int_x^{x+\delta x} \left(\int_t^{t+\delta t} \frac{\partial Z}{\partial \tau} dt \right) dx = 0 \quad (3.10)$$

onde a primeira integração resulta em:

$$\int_x^{x+\delta x} [Q(x+\delta x, t) - Q(x, t)] dt + \int_x^{x+\delta x} [A(x, t+\delta t) - A(x, t)] dx + \int_x^{x+\delta x} [Z(x, t+\delta t) - Z(x, t)] dx = 0 \quad (3.11)$$

e a segunda integração em:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left[(Q_{x+\delta x, t} - Q_{x, t})_{t+\delta t} + (Q_{x+\delta x, t} - Q_{x, t})_t \right] \delta t + \\ & \frac{1}{2} \left[(A_{x, t+\delta t} - A_{x, t})_{x+\delta x} + (A_{x, t+\delta t} - A_{x, t})_x \right] \delta x + \\ & \frac{1}{2} \left[(Z_{x, t+\delta t} - Z_{x, t})_{x+\delta x} + (Z_{x, t+\delta t} - Z_{x, t})_x \right] \delta x = 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Uma vez que durante a fase de avanço o fluxo vai diminuindo ao longo da distância, pelo efeito da taxa de infiltração d'água no solo, caindo para zero na frente de avanço, a não linearidade no perfil tanto superficial como subsuperficial torna-se bastante acentuada, fazendo com que o fator $\frac{1}{2}$ não seja apropriado para ponderar as condições de fluxo; dessa forma, uma ponderação adequada deverá estar entre $\frac{1}{2}$ a 1. Cria-se, então, os fatores θ e ϕ para ponderarem a não linearidade no perfil, respectivamente, com relação ao tempo e ao espaço. Estes fatores são extremamente importantes apenas durante a fase de avanço, porque depois desta fase há uma tendência de se estabelecer condições estáveis de fluxo. A ponderação deve ser maior no tempo $t+\delta t$ porque durante a fase de avanço a não linearidade aumenta com o tempo, sendo máxima quando a água atinge o final da área (condições de fluxo nulas); como também deve ser maior na seção de entrada porque a altura de fluxo varia mais rapidamente nesta seção, uma vez que é nela onde a vazão está sendo aplicada.

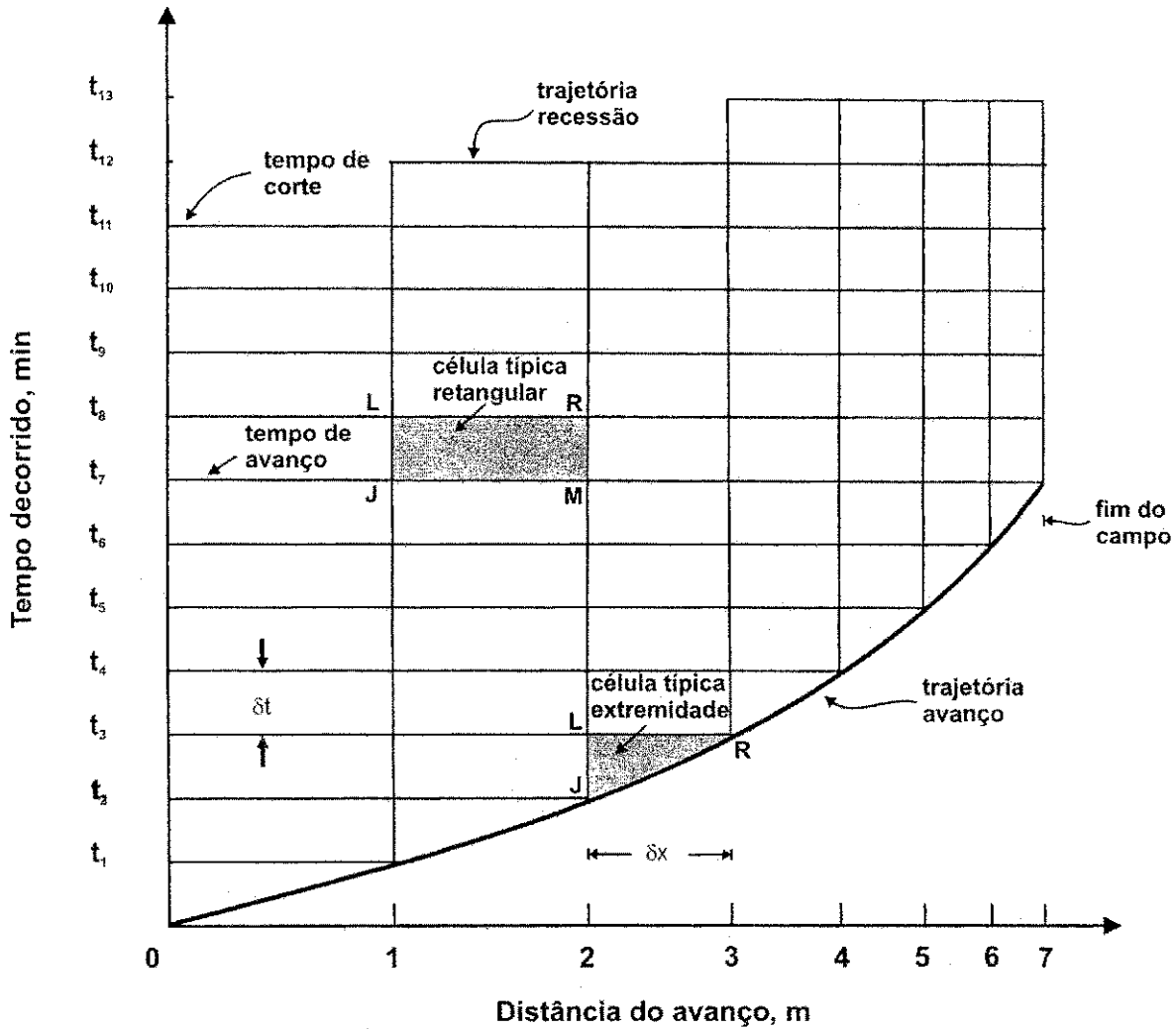
Substituindo, na Equação 3.12, $1/2$ por θ , $(1 - \theta)$, ϕ , $(1 - \phi)$ e escrevendo as variáveis de fluxo em termos das anotações de uma célula computacional, tem-se:

A Equação 3.12 pode, então, ser representada em termos da anotação apresentada na Figura 3.2, como segue:

$$\begin{aligned} & [\theta(Q_R - Q_L) + (1 - \theta)(Q_M - Q_J)]\delta t + \\ & [\phi(A_L - A_J) + (1 - \phi)(A_R - A_M)]\delta x + \\ & [\phi(Z_L - Z_J) + (1 - \phi)(Z_R - Z_M)]\delta x = 0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

sendo θ e ϕ coeficientes de ponderação temporal e espacial, respectivamente, cujos valores variam entre $1/2$ e 1 . Em geral, tem-se tomado valores iguais a $0,65$ e $0,51$ para θ e ϕ , respectivamente. Walker (2001) em seu software SIRMOD III, usa $0,60$ para ambos; o mesmo valor adotado nesta pesquisa.

A solução numérica é obtida resolvendo-se a Equação 3.13 para cada célula na malha computacional (Fig. 3.3) começando-se horizontalmente da esquerda para a direita, em cada etapa de cálculo. As únicas incógnitas em cada célula, são Q_R e A_R ; entretanto, uma vez que Q está sendo calculado explicitamente pela equação de Manning (Equação 3.6), não se o considera uma incógnita; o mesmo caso é aplicado a Z (infiltração) o qual está sendo calculado pela equação de Kostiakov-Lewis; o que se faz é substituir as equações de Q e Z na Equação 3.13, ficando, então, esta apenas com uma incógnita (A_R).



FONTE : WALKER (2001)

Figura 3.3. Malha computacional (Walker, 2001)

Substituindo-se a Eq. 3.6 na Eq. 3.13 e se dividindo por $\theta\alpha/\delta t$ chega-se á seguinte equação não linear em A_R :

$$A_R^m + \left(\frac{1-\phi}{\theta\alpha}\right) \frac{\delta x}{\delta t} A_R - A_L^m + \left(\frac{1-\theta}{\theta}\right) (A_M^m - A_J^m) + \frac{\phi}{\theta\alpha} (A_L + Z_L - A_J - Z_J) \frac{\delta x}{\delta t} + \left(\frac{1-\phi}{\theta\alpha}\right) (Z_R - A_M - Z_M) \frac{\delta x}{\delta t} = 0 \tag{3.14}$$

Objetivando-se simplificar a Equação 3.14, isola-se as constantes e variáveis com valores conhecidos a partir da etapa de cálculo anterior nos coeficientes C_1 e C_2 . Tem-se então:

$$C_1 = \left(\frac{1-\phi}{\theta \alpha} \right) \frac{\delta x}{\delta t} \quad (3.15)$$

e,

$$C_2 = -A_L^m - \left(\frac{1-\theta}{\theta} \right) A_J^{m+1} + \left(\frac{1-\theta}{\theta} \right) A_M^{m+1} + \frac{\phi}{\alpha \theta} (A_L + Z_L - A_J - Z_J) \frac{\delta x}{\delta t} + \left(\frac{1-\phi}{\alpha \theta} \right) (Z_R - A_M - Z_M) \frac{\delta x}{\delta t} \quad (3.16)$$

chegando-se à equação

$$A_R^{m+1} + C_1 A_R + C_2 = 0 \quad (3.17)$$

A Eq. 3.17 é utilizada para células interiores e para a primeira célula, depois da primeira etapa de cálculo. Uma vez que a Eq. 3.17 é solucionada implicitamente (pelo método de Newton-Raphson) para cada célula separadamente, não se tem então uma matriz. Esta equação é usada de forma implícita para determinar A_R e, depois, se determina, explicitamente Q_R , pela equação de Manning (Eq. 3.6)

3.1.3. Condições iniciais

As Equações 3.15 a 3.17 geram soluções para todas as células, exceto para aquelas na frente de avanço, célula ponta, dadas as condições de contorno, em que A_R , A_J , A_M , Z_R , Z_J e Z_M são iguais a zero. Para essas células, a formulação matemática das Equações 3.15 a 3.17 reduz a:

$$-A_L^m + \frac{\phi}{\alpha \theta} (A_L + Z_L) \frac{\delta x_1}{\delta t} = 0 \quad (\text{célula ponta}) \quad (3.18)$$

Como A_L é conhecida da solução da célula anterior e Z_L é função única do tempo de oportunidade de infiltração, a única incógnita nas células da frente de avanço é, então, a distância incremental (δx); dessa forma, a Equação 3.18 reduz-se a:

$$\delta x_1 = \frac{\theta \alpha A_L^m \delta t}{\phi (A_L + Z_L)} \quad (3.19)$$

Quando o suprimento de água na entrada da área é cortado, assume-se que a área no contorno esquerdo, A_L , cai imediatamente a zero. A partir do corte da água se inicia a fase de recessão e os cálculos são feitos de forma similar aos da fase de avanço e terminam quando a área molhada é reduzida a um valor igual ou menor que o 5% do valor da área na entrada do sulco.

3.1.4. Condições de contorno

Os sistemas de irrigação por superfície tem duas condições de contorno de jusante: (1) um tipo de célula durante a fase de avanço, e (2) uma célula retangular para a fronteira do campo. No caso (2), várias configurações são possíveis, mas usualmente limitados para condição limite ($Q_N = 0$) ou um fluxo de saída uniforme; entretanto, em algumas condições a descarga pode passar sobre ou através da estrutura com diferente característica hidráulica, o mesmo que uma drenagem livre de campo na fronteira; neste caso, é necessário se estabelecer uma avaliação da descarga de estrutura para usa-la como escoamento na condição de contorno.

O contorno à montante é definido pelas condições de fluxo na cabeceira da área irrigada, na qual $A = 0$ e $Q = 0$ para $t = 0$ e $t > t_{ap}$ (tempo de aplicação) e $A = A_o$ e $Q_o = a A^m$ para $0 < t \leq t_{ap}$. As condições de fluxo no contorno à jusante são descritas pelas Equações 3.6 e 3.19, respectivamente, para as fases de avanço e armazenamento, com ocorrência de escoamento superficial. Quando o fluxo atinge o final do campo, as variáveis M e R não serão zero para todos os intervalos de tempo. Para estas condições, como pode ser generalizado para a drenagem livre, dique, ou condições controladas, a condição de contorno pode ser escrita pela equação de Manning (Equação 3.6).

3.1.5. Fases de depleção e recessão

Geralmente, assume-se que, quando a vazão é suspensa a área (A_L) na seção de entrada, cai imediatamente para zero, ou seja, a fase de depleção é negligenciada; esta é uma hipótese razoável para sulcos em declive. O comportamento da fase de recessão é similar ao de avanço, mas em sentido contrário ao fluxo. Normalmente considera-se que a recessão termina numa seção quando a área de fluxo nela é menor ou igual a 5% da área de fluxo original na seção de entrada. Neste trabalho negligenciou-se as fases de depleção e

recessão, considerando que a irrigação se encerra quando o fluxo d'água é suspenso, ou seja, admitiu-se que o tempo de recessão é igual ao tempo de corte.

3.1.6. Equação de infiltração d'água

Nenhum outro fator é tão significativo em irrigação por superfície como a infiltração, e tão difícil de medir ou prever com confiabilidade e precisão. Ao longo dos anos, a infiltração recebeu muita atenção teórica. Hoje, existem várias equações, que descrevem a infiltração, como as de Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton, Philip e Green-Ampt. Adotou-se nesta pesquisa a Equação de Kostiakov-Lewis apresentada

$$Z = k\tau^a + f_o\tau \quad (3.20)$$

em que: Z - infiltração acumulada, $m^3 m^{-1} min^{-1}$,

τ - tempo de oportunidade de infiltração, min,

k - constante da equação de infiltração de Kostiakov-Lewis, $m^3 min^{-a} m^{-1}$,

a - coeficientes empíricos da equação de infiltração de Kostiakov-Lewis; e

f_o - taxa de infiltração básica em $m^3 m^{-1} min^{-1}$.

3.1.7. Vazão máxima não erosiva

O procedimento seguinte é utilizado no software SASIS (Software Aplicado a Simulação da Irrigação por Superfície), desenvolvido nesta pesquisa:

A vazão aplicada em cada sulco deve se adequar ao seu comprimento e à sua declividade, e à natureza do solo. A uma vazão maior corresponde um avanço mais rápido da água no sulco, e vice-versa. Em geral, o melhor desempenho da irrigação se consegue quando o umedecimento do sulco se faz com o avanço mais rápido possível, e isto requer que se utilize uma vazão máxima, isto é, aquela que não cause erosão (vazão máxima não erosiva). Desde que a água chegue ao extremo inferior do sulco, a vazão pode ser reduzida, de forma que satisfaça aos requerimentos da velocidade de infiltração básica e se mantenha até o final da irrigação (vazão permanente).

Para se encontrar a vazão máxima não erosiva, em $L s^{-1}$, um método prático, recomendado por Bishop et al. (1981) se baseia na equação de Gardner, modificada por Criddle, da seguinte forma:

$$Q_{max} = \frac{0,631}{S_o} \quad (3.21)$$

onde: S_o é a declividade longitudinal do sulco, em porcentagem.

Para o cálculo da vazão máxima não erosiva o software SASIS se baseou no método recomendado por Walker & Skogerboe (1987). Os autores estudaram a vazão máxima não erosiva, em função de parâmetros obtidos a partir das dimensões do sulco e propuseram a seguinte equação:

$$Q_{max} = \left[\left(\frac{V_{max}^{\rho_2} n^2}{3600 S_o \rho_1} \right) \right]^{\frac{1}{\rho_2-2}} \quad (3.22)$$

em que: Q_{max} - vazão máxima não erosiva, $m^3 \text{ min}^{-1}$;

V_{max} - velocidade máxima não erosiva, $m \text{ min}^{-1}$;

n - coeficiente de Manning, $m^{-1/3} s$;

ρ_1 e ρ_2 - coeficientes que expressam a geometria do sulco, adimensional; e

S_o - declividade do sulco, $m m^{-1}$.

3.1.8. Vazão ótima

Na determinação da relação entre vazão e a eficiência de aplicação d'água, taxas de percolação e de escoamento, inúmeras simulações foram realizadas pelo modelo SASIS numa faixa de vazão compreendida entre a mínima e a máxima permitidas, sendo a simulação iniciada pela vazão mínima e sucedendo-se com incrementos de 2% na vazão, até se atingir a vazão máxima permitida, a vazão ótima foi considerada a vazão que apresenta a melhor performance da irrigação, ou seja, que apresenta a melhor eficiência de aplicação de água, atendendo a lâmina requerida de projeto.

3.1.9. Procedimento de avaliação do sistema de irrigação por superfície

A avaliação de um sistema de irrigação por superfície identificará várias práticas de manejo, que podem ser implementadas para melhorar a eficiência do sistema de irrigação. A avaliação pode mostrar que, alcançando eficiências mais altas, requer uma redução no fluxo e no tempo de sua aplicação ou pode indicar que, para melhorar o desempenho, requer mudanças no comprimento do campo; talvez uma combinação de várias estratégias fosse necessária. O objetivo principal do software SASIS é ajudar na busca de estratégias de manejo da irrigação por superfície, que resultem em índices de desempenho satisfatórios.

O procedimento de avaliação da irrigação por sulco, proposto por Walker & Skogerboe (1987) usado nesta análise envolve inicialmente, a regra trapezoidal para integrar o perfil subsuperficial de fluxo, determinando, assim, o volume total infiltrado. Tem-se então:

$$V_z = \frac{L}{2n} [Z_o + (2Z_1 + 2Z_2 + \dots + 2Z_{n-1}) + Z_n] \quad (3.23)$$

em que: L - comprimento da área, m;

Z_i - infiltração acumulada para o ponto i , $m^3 m^{-1}$; e

n - número de segmentos em que o sulco é subdividido.

A infiltração acumulada em cada segmento do sulco é dada por:

$$Z_i = k [t_r - (t_a)_i]^a + f_o [t_r - (t_a)_i] \quad (3.24)$$

sendo: k - constantes da equação de Kostiakov-Lewis, $m^3 \text{ min}^{-a} m^{-1}$

a - constantes empírica da equação de Kostiakov-Lewis;

f_o - taxa de infiltração básica, $m^3 m^{-1} \text{ min}^{-1}$;

t_r - tempo de recessão, min; e

$(t_a)_i$ - tempo de avanço para a i -ésima estação, min.

A fase de recessão é marcada pelo desaparecimento da água da superfície do solo. Para alguns autores, a recessão ocorre logo que a aplicação da água termina. Neste trabalho as fases de depleção e recessão foram negligenciadas, considerando-se que o tempo de corte, t_{com} , substitui t_r na Equação 3.24.

3.1.10. Medidas de avaliação do desempenho

Entre os fatores considerados na avaliação do desempenho de um sistema de irrigação ou de seu manejo, os mais comuns são eficiência e uniformidade. Os parâmetros de avaliação foram definidos de vários modos. Não há um parâmetro simples que, adequadamente, defina desempenho de irrigação. Conceitualmente, a adequação de uma irrigação depende da quantidade de água armazenada no sistema radicular da cultura, das perdas por percolação (abaixo da zona radicular), das perdas por escoamento superficial, da uniformidade da água aplicada e do déficit remanescente na zona radicular. No final das contas, a medida de desempenho é saber se a irrigação otimiza ou não a produção e a rentabilidade da cultura.

Na ordem de índice desses fatores no ambiente da superfície irrigada, as seguintes suposições são feitas:

1. a umidade é extraída de um solo uniforme através do sistema radicular das culturas com relação à profundidade e ao local;
2. a função de infiltração para o solo é uma relação única entre a lâmina infiltrada e o tempo em que a água fica em contato com o solo (tempo de oportunidade de infiltração);
3. o objetivo de irrigar é suprir completamente a zona radicular.

Quando um campo apresenta declividade uniforme, o solo recebe fluxo uniforme na sua extremidade superior e uma frente de água avançará lentamente a uma taxa decrescente, até que chegue ao fim do campo. Se não for bloqueado, runoff acontecerá até ao término da recessão. A Figura 3.4 mostra a distribuição da água aplicada ao longo do comprimento do campo, originada das suposições apresentadas acima. As diferenças ao longo da área no tempo de oportunidade de infiltração produzem lâminas aplicadas que não são, uniformemente distribuídas - com uma forma característica inclinada para o final do campo.

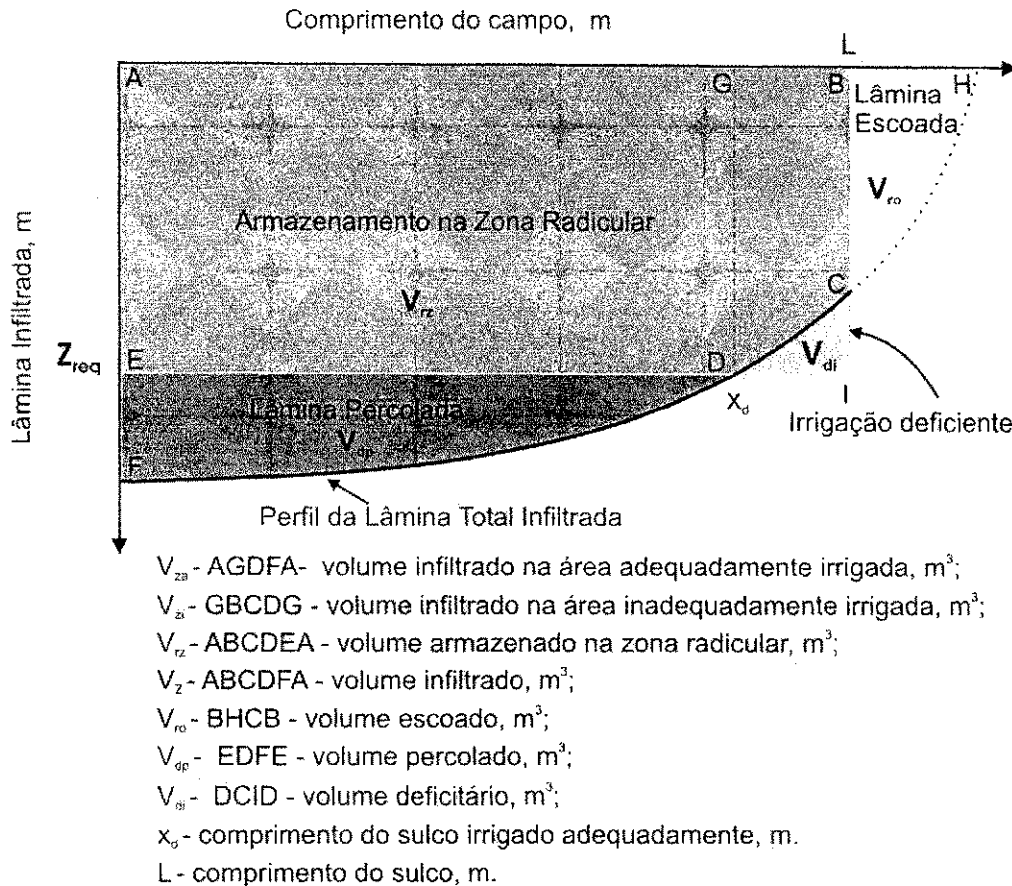


Figura 3.4. Componentes da água infiltrada na irrigação superficial

A quantidade de água que pode ser armazenada na zona radicular é $L \cdot Z_{req}$ mas, como mostrado, alguma região da zona radicular talvez não receba água devido à distribuição espacial da infiltração. A lâmina de água que supriria a zona radicular é Z_{req} , e a água que percola abaixo desta zona é perdida¹ para a drenagem ou sistema do lençol freático. Para se calcular cada um desses componentes, requer-se uma integração numérica da lâmina infiltrada ao longo do comprimento do campo; com a finalidade desta discussão, é conveniente definir os componentes, como segue: V_{rz} é o volume de água por unidade de largura ou por espaçamento de sulco, que é realmente armazenado na zona radicular; V_{di} é o volume de água por unidade de largura ou por espaçamento de sulco, correspondente à porção da zona radicular não umedecida; V_{dp} é o volume de água por unidade de largura ou por espaçamento de sulco que percola abaixo da zona radicular; V_{ro} é o volume de água por

¹ Geralmente, esses fluxos retornam ao reservatório, podendo ser reutilizados em outro lugar ou na mesma área. Deste modo, eles são perdidos em termos da área irrigada em questão, mas talvez não para condição regional ou da bacia. As conotações negativas de perda devem ser mantidas para a área que está sendo irrigada, embora esta água possa ser recuperada e reutilizada. A qualidade desses fluxos quase sempre não é boa e o tempo de reutilização não deve ser computado (Walker, 2001)

unidade de largura ou por espaçamento de sulco que escoou fora da área irrigada; Z_{min} é a lâmina mínima infiltrada, geralmente acontece no final do sulco, e Z_{lq} é a lâmina média de água infiltrada nos 25% da área menos irrigada.

Uniformidade de distribuição se refere à distribuição de água no perfil do solo. Merriam & Keller (1978) propuseram que a uniformidade de distribuição seja definida como a lâmina média infiltrada nos 25% da área menos irrigada do campo (Z_{lq}) dividido pela lâmina média infiltrada de toda área (\bar{Z}). Este termo pode ser representado pelo símbolo UD . Os mesmos autores também sugerem uma uniformidade de distribuição absoluta, UD_a , que é a lâmina mínima (Z_{min}) dividida pela lâmina média de toda área; assim:

Para condição de irrigação sem déficit, utilizou-se as seguintes equações:

$$E_a = \frac{Z_{req} L}{Q \cdot t_{com}} 100 \quad (3.25)$$

$$TP = \frac{V_z - Z_{req} L}{Q \cdot t_{com}} 100 \quad (3.26)$$

$$TE = 100 - E_a - TP \quad (3.27)$$

E_r = eficiência de armazenamento

$$E_r = 100\%$$

em que: Z_{req} - lâmina requerida de projeto para aplicação no sulco, m;

L - comprimento do sulco, m;

Q - vazão de entrada, $m^3 \text{ min}^{-1}$;

t_{com} - tempo de corte da água de irrigação, min; e

V_z - volume infiltrado, m^3 .

Para o caso de irrigação deficitária, utilizou-se as seguintes equações:

$$E_a = \frac{Z_{req} x_d + V_{zi}}{Q \cdot t_{com}} 100 \quad (3.28)$$

$$TP = \frac{V_{za} - Z_{req} x_d}{Q \cdot t_{com}} 100 \quad (3.29)$$

$$TE = 100 - E_a - TP \quad (3.30)$$

$$E_r = \frac{Z_{req} x_d + V_{zi}}{Z_{req} L} 100 \quad (3.31)$$

em que: Z_{req} - lâmina requerida de projeto para aplicação no sulco, $m^3 m^{-1}$;

x_d - comprimento do sulco irrigado adequadamente, m;

Q - vazão de entrada, $m^3 min^{-1}$;

t_{com} - tempo de corte da água de irrigação, min;

L - comprimento do sulco, m;

V_{za} - volume infiltrado na área adequadamente irrigada, m^3 ; e

V_{zi} - volume infiltrado na área inadequadamente irrigada, m^3 .

$$UD = \left(\frac{Z_{lq}}{\bar{Z}} \right) 100 \quad \text{ou} \quad UD = \left(\frac{L \cdot Z_{lq}}{V_{rz} + V_{dp}} \right) 100 \quad (3.32)$$

$$UDa = \left(\frac{Z_{min}}{\bar{Z}} \right) 100 \quad \text{ou} \quad UDa = \left(\frac{L \cdot Z_{min}}{V_{rz} + V_{dp}} \right) 100 \quad (3.33)$$

A definição de eficiência de aplicação, E_a , foi padronizada como:

$$E_a = \frac{V_{rz}}{V_{rz} + V_{dp} + V_{ro}} \quad (3.34)$$

A eficiência de requerimento de água, E_r , que também é geralmente chamada eficiência de armazenamento, é definida como:

$$E_r = \frac{V_{rz}}{V_{rz} + V_{di}} \quad (3.35)$$

Se parte do sulco tiver uma lâmina infiltrada menor que a requerida, o volume infiltrado deverá ser avaliado separadamente para as áreas de irrigação excessiva e deficitária. Depois de se identificar a seção de sulco, x_d , a partir da qual a lâmina infiltrada

é menor que a requerida, o volume infiltrado será calculado para a área adequadamente irrigada, V_{za} , pela Eq. 3.23 e para a área inadequadamente irrigada, V_{zi} , com a seguinte:

$$V_{zi} = V_z - V_{za} \quad (3.36)$$

O volume escoado por unidade de largura é dado por:

$$V_{ro} = Q t_{com} - V_z \quad (3.37)$$

A taxa de escoamento (TE) é determinada pela equação:

$$TE = \left(\frac{V_{ro}}{Q t_{com}} \right) 100 \quad (3.38)$$

A taxa de percolação como segue:

$$TP = 100 - E_a - TE \quad (3.39)$$

As simulações feitas pelo modelo SASIS são para a condição de escoamento superficial, separando a porção infiltrada e escoada no campo. Da água que se infiltra na superfície do campo, o software determina quanto é armazenada na zona do solo onde as raízes podem extrair água, como também quanto percola abaixo desta zona. Considerando-se que esta informação é determinada para cada ponto simulado do campo, os dados podem ser usados para o cálculo de várias eficiências e uniformidades.

Os dados de campo utilizados na validação do modelo SASIS corresponderam a quatro conjuntos de dados (PISG1, PISG2, PISG3 e, PISG4) coletados nesta pesquisa, referentes às avaliações de campo de eventos de irrigação por sulco, no Perímetro Irrigado de São Gonçalo, no município de Sousa, PB, publicados por Azevedo et al. (2001) e Pordeus et al. (2003); dois conjuntos de dados (AMALGACQ, propriedade privada, e GUFCQ, fazenda da Utah State University em Logan, USA) publicados por Azevedo (1992), empregados na demonstração do modelo SIRTOM; e dois conjuntos de dados (KWF-Kimberly Wheel Furrow e DEMO1) publicados por Walker & Skogerboe

(1987). O conjunto de dados DEMO1 é utilizado na demonstração do modelo SIRMOD. Esses conjuntos de dados (Tabela 3.1) representam diferentes condições de campo, em que o comprimento de sulco variou de 67 a 403 m, a declividade de 0,0016 a 0,0173 m m⁻¹, a vazão de 1,1 a 2,0 L s⁻¹ e o tipo de textura do solo de franco arenoso a franco silte-argiloso; e dados de avanço medido em campo (Tabela 3.2).

Tabela 3.1. Dados de campo utilizados na validação do modelo SASIS

Dados de Campo	PISG1	PISG2	PISG3	PISG4	KWF	AMALGACQ	GUFCQ	DEMO1
Tipo de Solo	Franco argilo arenoso	Franco argilo arenoso	Franco arenoso	Franco argilo arenoso	Franco silte argiloso	Silte argiloso	Silte arenoso	Silte arenoso
Vazão (L s ⁻¹)	1,33*	1,47*	1,54*	1,13*	1,50**	1,80**	1,30**	2,00**
Comprimento do sulco (m)	67	84	70	115	360	403	217	250
Declividade (m m ⁻¹)	0,0030	0,0016	0,0043	0,0024	0,0104	0,0066	0,0173	0,0080
Coefficiente de Manning, n (m ^{-1/3} s)	0,020	0,020	0,025	0,020	0,013	0,013	0,013	0,040
Parâmetro da Seção, ρ_1	0,291	0,185	0,532	0,339	0,730	0,730	0,730	0,532
Parâmetro da Seção, ρ_2	2,847	2,766	2,840	2,806	2,980	2,980	2,980	2,840
k (m ³ m ⁻³ m ⁻¹)	0,03781	0,02931	0,01024	0,0054	0,0088	0,00182	0,00896	0,0028
a	0,165	0,302	0,326	0,412	0,533	0,234	0,0	0,534
f_o (m ³ min ⁻¹ m ⁻¹)	0,000186	0,000186	0,000264	0,000186	0,00017	0,00019	0,000022	0,000022
Z_{req} (m)	0,090	0,060	0,020	0,020	0,090	0,090	0,050	0,040

PISG1, PISG2, PISG3 e PISG4 – dados de campo obtidos no Perímetro Irrigado de São Gonçalo, estado da Paraíba, Brasil; KWF – publicado por Walker & Skogerboe (1989); AMALGACQ e GUFCQ – publicada por Azevedo (1992), empregado na demonstração do modelo SIRTOM; DEMO1 – publicado por Walker (1989), empregado na demonstração do modelo SIRMOD; * Vazão de praticada pelo produtor (irrigante); ** Vazão determinada em projeto, utilizada pelos autores nas demonstrações do SIRMOD e SIRTOM

Tabela 3.2. Dados de avanço d'água medido em campo utilizados na validação do modelo SASIS

PISG1		PISG2		PISG3		PISG4		KWF		AMALGACQ		GUFCQ	
XA	TA	XA	TA	XA	TA	XA	TA	XA	TA	XA	TA	XA	TA
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,7	2	9,09	1,05	7	1	11,5	3	40	5	31	12	31	4
13,4	4	18,18	2,35	14	2	23	5	80	14	62	22	62	8
20,1	6	27,27	3,6	21	3	34,5	7	100	20	93	30	93	12
26,8	9	36,36	5,0	28	5	46	10	120	30	124	46	124	16
33,5	13	45,45	6,5	35	7	57,5	14	140	37	155	53	155	20
40,2	16	54,54	8,5	42	10	69	17	160	48	186	68	186	24
46,9	20	63,64	9,65	49	13	80,5	27	200	75	217	85	217	28
53,6	23	72,73	11,55	56	16	92	40	220	89	248	98		
60,3	27	81,82	13,6	63	19	103,5	48	240	102	279	120		
67	32	90,91	15,65	70	24	115	66	275	130	310	140		
		100	17,95					300	150	341	155		
								320	170	372	191		
								350	200	403	232		
								360	208				

PISG1, PISG2, PISG3 e PISG4 – dados de campo obtidos no Perímetro Irrigado de São Gonçalo, estado da Paraíba, Brasil; KWF – publicado por Walker & Skogerboe (1989); AMALGACQ e GUFCQ – publicada por Azevedo (1992), empregado na demonstração do modelo SIRTOM; XA- distância de avanço d'água medido em campo, m; TA - tempo de avanço, min

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Validação do modelo

O modelo matemático computacional desenvolvido nesta pesquisa foi denominado SASIS, “Software Aplicado a Simulação da Irrigação por Superfície”, cujo objetivo de seu desenvolvimento foi colocar à disposição da comunidade científica, acadêmica, técnica e/ou de produtores agrícolas, uma ferramenta capaz de possibilitar a otimização do desempenho da irrigação por sulco com fluxo contínuo, a partir de sucessivas simulações da fase de avanço e respectivos prognósticos dos parâmetros de desempenho do sistema de irrigação. As simulações da fase de avanço são realizadas pelo modelo de ondas cinemáticas implementado nesta pesquisa com base no desenvolvimento teórico apresentado por Walker & Humpherys (1983).

Ao programa SASIS, aplica-se a metodologia de Burt et al. (1997) para avaliar os parâmetros de desempenho do sistema de irrigação por sulco. Esta metodologia foi apresentada por Walker & Skogerboe (1987) e utilizada no software SIRMORD III de Walker (1991). A otimização é feita para diferentes condições de campo (rugosidade e declividade da superfície do solo, infiltração d'água no solo, seção transversal de fluxo e comprimento da área), buscando a combinação entre os parâmetros operacionais (vazão e tempo de aplicação d'água) que maximize, então, o desempenho.

O modelo proposto nesta pesquisa, denominado SASIS (Software Aplicado a Simulação de Irrigação por Superfície), desenvolvido para simular a fase de avanço na irrigação superficial, prognosticar o desempenho de um evento de irrigação e selecionar a vazão ótima na irrigação por sulco com fluxo contínuo, foi validado com dados de campo e com o modelo SIRMOD desenvolvido por Walker (1989) e só então, validado para diferentes condições de campo, comparando-se o avanço simulado por ele com o avanço medido em campo e simulado pelo SIRMOD e, também, comparando o prognóstico feito pelo modelo proposto, dos parâmetros de avaliação do desempenho do sistema de irrigação com o fornecido pelo modelo SIRMOD.

Muitos aspectos de uma irrigação por sulco devem ser considerados na qualidade de sua simulação, dentre os quais se citam o modelo matemático empregado e o grau de precisão dos dados de campo, como mais importantes. Dentre as fases da irrigação superficial simuladas, o avanço é a mais significativa. Neste trabalho, o modelo SASIS não fez a simulação da fase de depleção e recessão, considerando-a igual ao tempo de corte do fluxo d'água no sulco, hipótese que leva em conta o fato de que na irrigação por sulco a duração da fase de recessão é muito curta em razão não apenas da declividade da superfície do solo mas, também, do volume de água armazenado no sulco no momento de corte da vazão, que é muito pequeno comparado ao de uma bacia ou de uma faixa, não contribuindo significativamente para o volume de água infiltrado, comprovação esta ressaltada mais adiante. A qualidade da simulação reflete na precisão do prognóstico de parâmetros extremamente relevantes no dimensionamento, manejo e avaliação da irrigação por sulco, tais como: volumes infiltrados, escoados e percolados, e parâmetros de desempenho da irrigação, que são: eficiência de aplicação, perdas por percolação e escoamento, eficiência de armazenamento, uniformidade de distribuição e uniformidade de distribuição absoluta.

4.2. Simulação do avanço

As curvas de avanço correspondentes às medições de campo e simulações pelos modelos SIRMOD e SASIS para a irrigação por sulco com fluxo contínuo, são apresentadas nas Figuras 4.1 a 4.8. Quando se comparam as curvas simuladas por ambos os modelos com as medições de campo, observa-se semelhança entre estes e os valores simulados e medidos. Na maioria das simulações, o tempo de avanço é superestimado

pelos dois modelos. Para os dados de campo de PISG1 observa-se, na Tabela 4.1 que, no final da área, o tempo de avanço é superestimado em 8 min, pelo modelo SASIS e em 35,2 min pelo SIRMOD correspondendo, portanto, a uma variação de 20 e 110%, respectivamente; verifica-se na Figura 4.1 que o avanço simulado pelo SASIS ao longo da área se aproxima mais dos valores medidos em campo que o SIRMOD; já a curva de avanço simulada pelo modelo SIRMOD se acerca mais dos valores medidos em campo em apenas nos primeiros 50% do comprimento do sulco; no restante, a curva de avanço torna-se menos linear em relação à simulada pelo SASIS e aos valores medidos em campo, a medida em que se avizinha do final da área; os valores simulados pelo SASIS aproximam-se dos valores medidos em campo do início da área até o seu final, o que não acontece com o SIRMOD, o qual simulou 27,2 min a mais no final da área que o SASIS; para este caso, verifica-se melhor simulação do tempo de avanço pelo modelo SASIS.

Tabela 4.1. Tempo de avanço no final da área medido em campo e simulado pelos modelos SIRMOD e SASIS

CONJUNTO DE DADOS	TEMPO DE AVANÇO (min)				
	CAMPO	SIRMOD		SASIS	
		Simulado	Δ (%)	Simulado	Δ (%)
PISG1	32	67,2	+ 100	40	+ 20
PISG2	69	113,6	+ 64,6	65	- 5,8
PISG3	24	23,4	- 2,5	30	+ 25
PISG4	66	56,6	- 14,2	65	- 1,5
KWF	200	190	- 5	130	- 35
AMALGACQ	232	67,3	- 71	265	+ 14,2
GUFCQ	28	57,3	+ 104,6	45	+ 60,7
DEMO1		101,6		130	-

Δ (%) - Diferença percentual em relação ao medido em campo

No exemplo PISG2 observa-se que na Figura 4.2, mais uma vez os valores simulados pelo modelo SASIS se aproximam mais dos valores medidos em campo que o SIRMOD; o tempo de avanço no final da área é subestimado pelo SASIS em 5,8% e superestimado pelo SIRMOD em 64,6%; os tempos de avanço medidos em campo e simulados pelos SASIS e SIRMOD foram, respectivamente, de 69, 65 e 113,6 min (Tabela 4.1); a curva de avanço simulada pelo SIRMOD apresenta o mesmo

comportamento do exemplo anterior, isto é, nos primeiros 50% do comprimento do sulco os valores simulados se aproximam mais dos valores medidos, com valores mais próximos no início da área, enquanto no restante da área a diferença é crescente sempre que se aproxima do final do campo.

Para os dados de campo PISG3 (Figura 4.3), quando se comparam os valores de avanço medidos com os simulados vê-se que o SIRMOD se aproxima mais dos dados de campo que o SASIS; o SIRMOD subestima tempo de avanço no final da área, em 2,5%, enquanto o SASIS superestima em 25%; para este exemplo, o tempo de avanço medido e o simulado pelo SIRMOD e SASIS no final da área, foram de 24, 23,4 e 30 min (Tabela 4.1) respectivamente e, embora a diferença percentual entre os tempos de avanço medido e simulado pelo SASIS tenha sido de 25%, a diferença absoluta foi de apenas 6 min e a diferença entre o tempo simulado pelos dois modelos foi de somente 6,6 min, o que mostra consistência na simulação realizada pelo modelo SASIS.

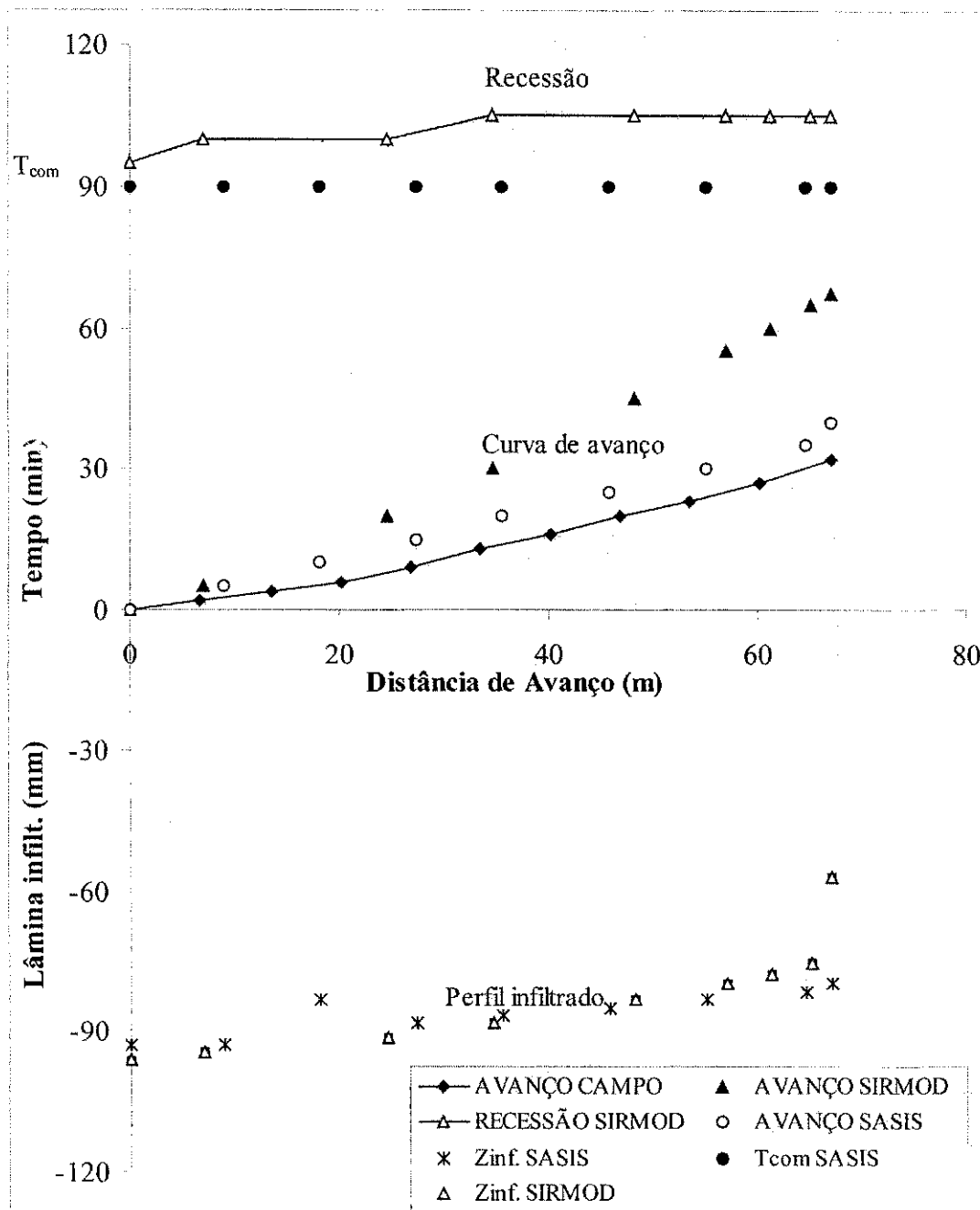


Figura 4.1. Curvas de avanço medida em campo e simulada pelos modelos SIRMOM e SASIS; recessão simulada pelo SIRMOM e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SISRMO e SASIS (PISG1, comprimento 67 m)

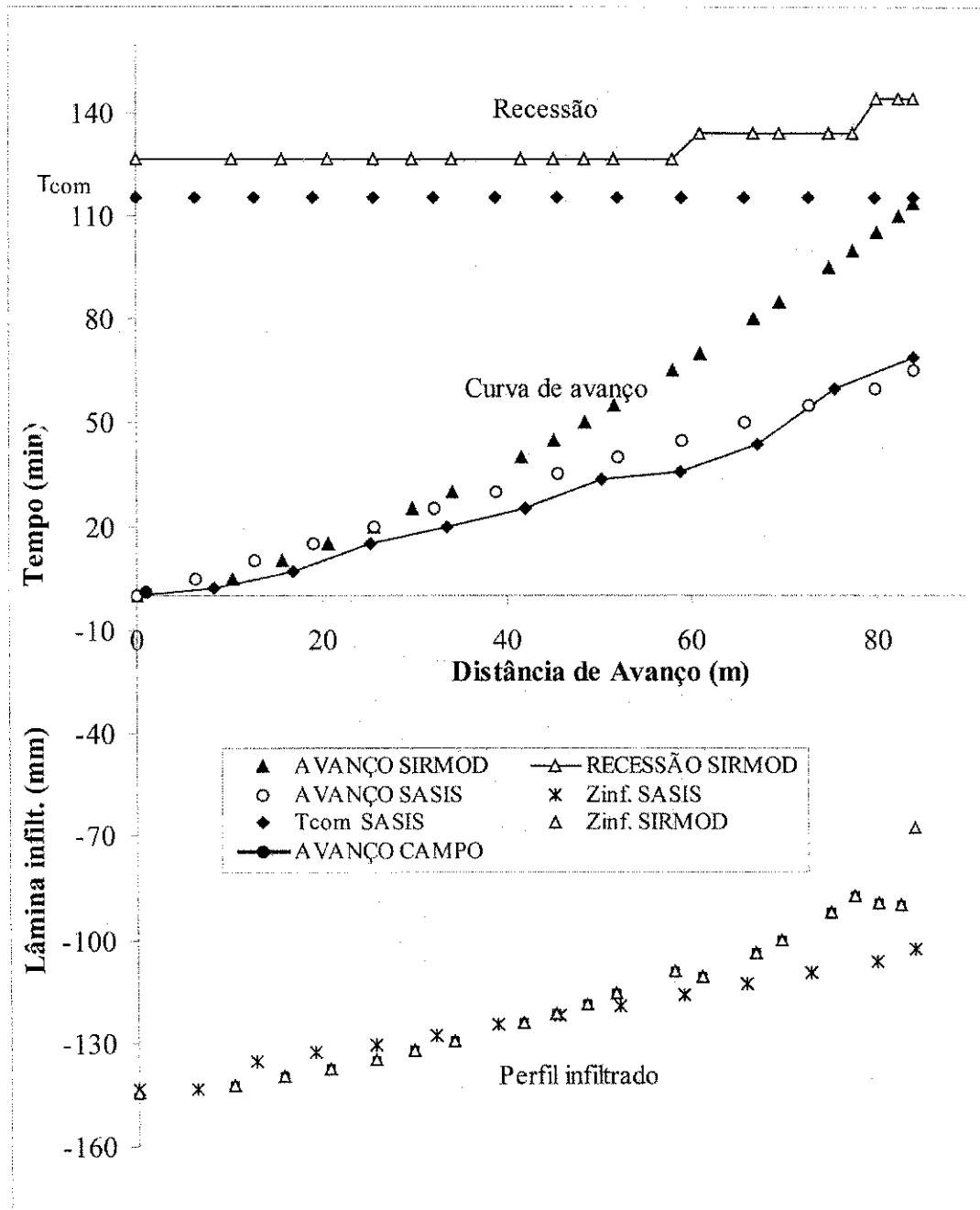


Figura 4.2. Curvas de avanço medida em campo e simulada pelos modelos SIRM e SASIS; recessão simulada pelo SIRM e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SIRM e SASIS (PISG2, comprimento 84 m)

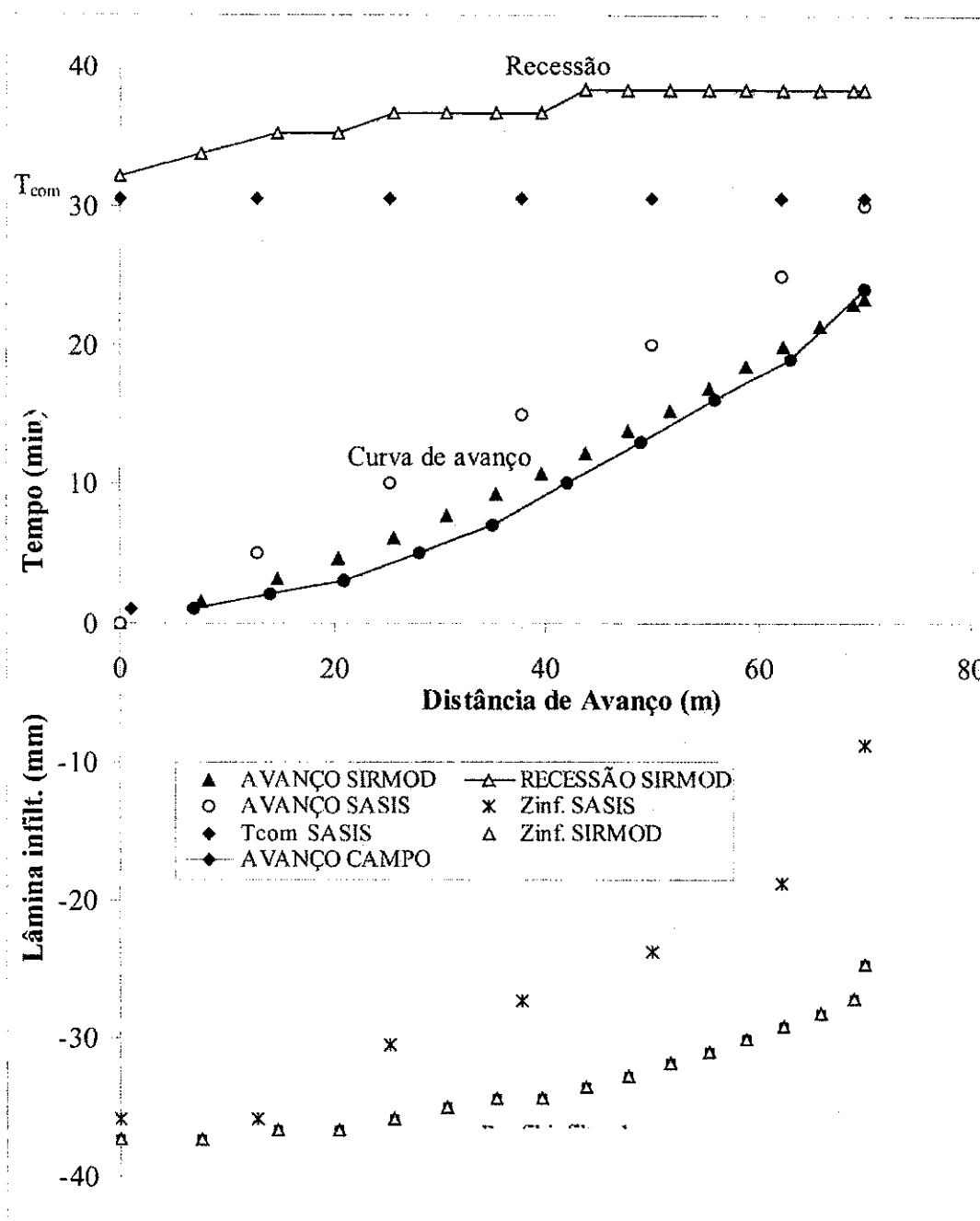


Figura 4.3. Curvas de avanço medida em campo e simulada pelos modelos SIRMÓD e SASIS; recessão simulada pelo SIRMÓD e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SIRMÓD e SASIS (PISG3, comprimento 70 m)

Observa-se, na Figura 4.4, que para os dados de campo PISG4 o avanço simulado pelo SIRMÓD se acerca mais dos valores de avanço medidos que o SASIS, que superestimou o avanço praticamente em todo o comprimento do sulco, com valores maiores em torno do centro da área, o que ocorreu também com o SIRMÓD, mas com menores diferenças; nesta Figura 4.4 ainda se constata que, exatamente nesta região, ocorre

mudança no comportamento da curva de avanço medido em campo, mas no final da área o tempo de avanço simulado pelo SASIS se assemelha mais ao de campo; para este exemplo, os tempos de avanço medido no final da área e simulados pelos modelos SASIS e SIRMOD foram, respectivamente, de 66, 65 e 56,6 min (Tabela 4.1); conclui-se, daí, que o SASIS subestimou o avanço em apenas 1 min, enquanto o SIRMOD em 9,4 min, correspondendo a variações percentuais de 1,5 e 14,2%, respectivamente, em relação aos dados de campo. Embora o SIRMOD tenha apresentado variação maior no final da área, o avanço simulado ao longo da área se assemelhou mais aos valores medidos, resultando num prognóstico do perfil de infiltração mais coerente com o que aconteceu em campo.

No exemplo KWF o tempo de avanço medido no final da área foi de 200 min e os simulados pelos modelos SASIS e SIRMOD foram, respectivamente, 130 e 190 min constatando-se, então, que o modelo SASIS subestimou o avanço em 35% e o SIRMOD em 5% (Tabela 4.1); verifica-se pela Figura 4.5 que nos primeiros 50% do comprimento da área os avanços simulados pelos dois modelos se assemelham aos medidos em campo, subestimando no restante da área, com maiores diferenças sempre que se aproxima do final da área.

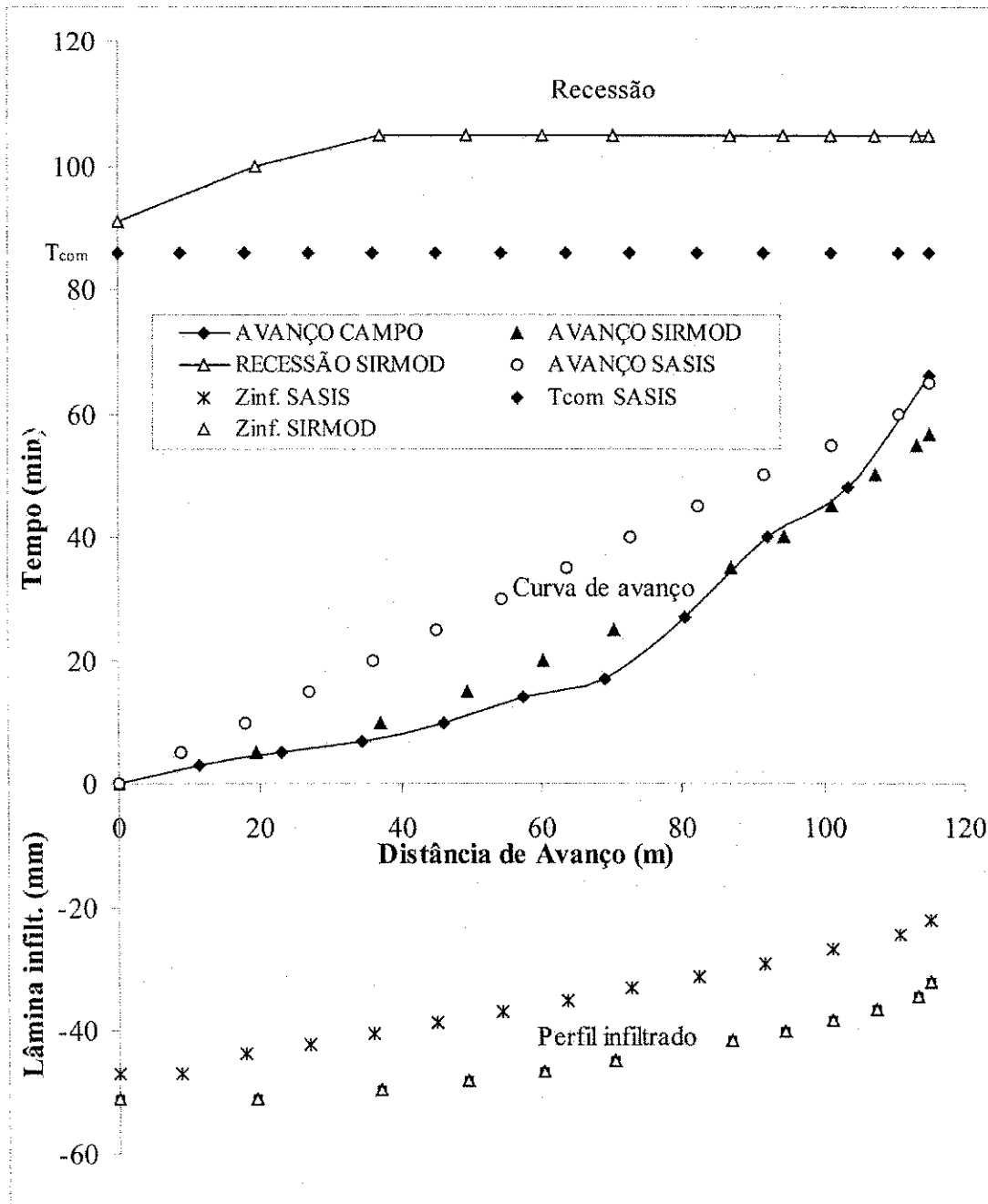


Figura 4.4. Curvas de avanço medida em campo e simulada pelos modelos SIRMOD e SISIS; recessão simulada pelo SIRMOD e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SISIS; e perfis de infiltração calculados para o SIRMOD e SISIS (PISG4, comprimento 115 m)

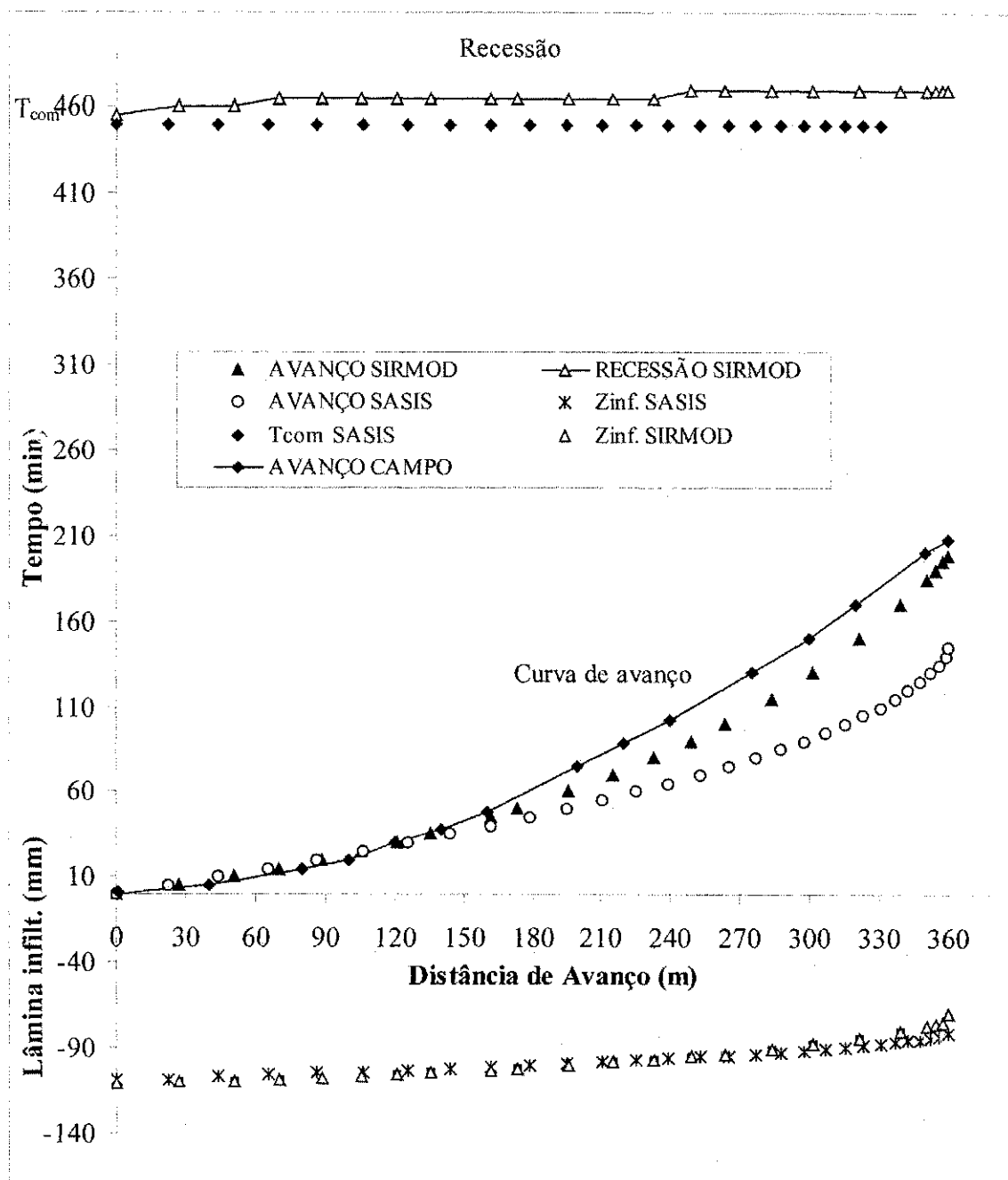


Figura 4.5. Curvas de avanço medida em campo e simulada pelos modelos SIRMOD e SASIS; recessão simulada pelo SIRMOD e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SIRMOD e SASIS (KWF, comprimento 360 m)

Quanto aos dados de campo AMALGACQ nota-se, na Figura 4.6, que o avanço simulado pelo modelo SASIS é similar, ao longo de toda a área, ao medido em campo, o que não ocorre com o avanço simulado pelo modelo SIRMOD; o avanço medido no final da área e simulado pelos modelos SASIS e SIRMOD foram, respectivamente, 232, 265 e 67,3 min (Tabela 4.1), verificando-se que o modelo SASIS superestimou o avanço

em 33 min, enquanto o SIRMOD o subestimou em 164,7 min, correspondendo a variações percentuais de 14,2 e 71%, respectivamente; desta forma, o modelo SASIS apresentou maior precisão na simulação.

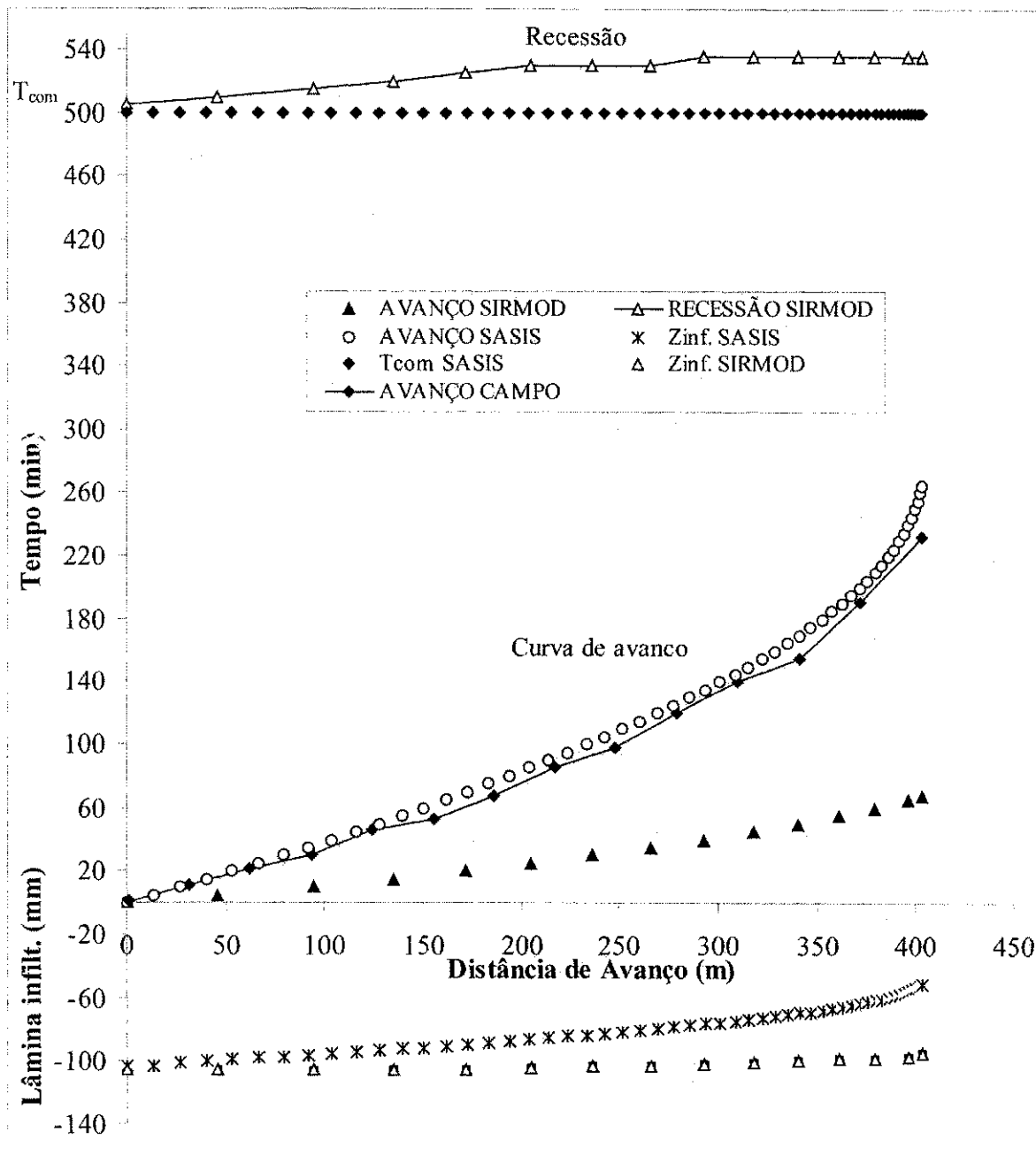


Figura 4.6. Curvas de avanço medida em campo e simulada pelos modelos SIRMOD e SASIS; recessão simulada pelo SIRMOD e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SISRMO e SASIS (AMALGACQ, comprimento 403 m)

Para os dados GUFQC observa-se, na Figura 4.7 que, no geral, as curvas de avanço obtidas pelos modelos SASIS e SIRMOD se assemelham à curva de avanço medida em campo; entretanto, o tempo de avanço medido no final da área e simulado pelos modelos SASIS e SIRMOD, foram 28, 45 e 57,3 min (Tabela 4.1), respectivamente, apresentando superestimativas de 17 (SASIS) e 29,3 min (SIRMOD), que se referem a variações percentuais de 60,7 e 104,6%. O modelo SIRMOD o superestimou em 43,9% a mais que o SASIS.

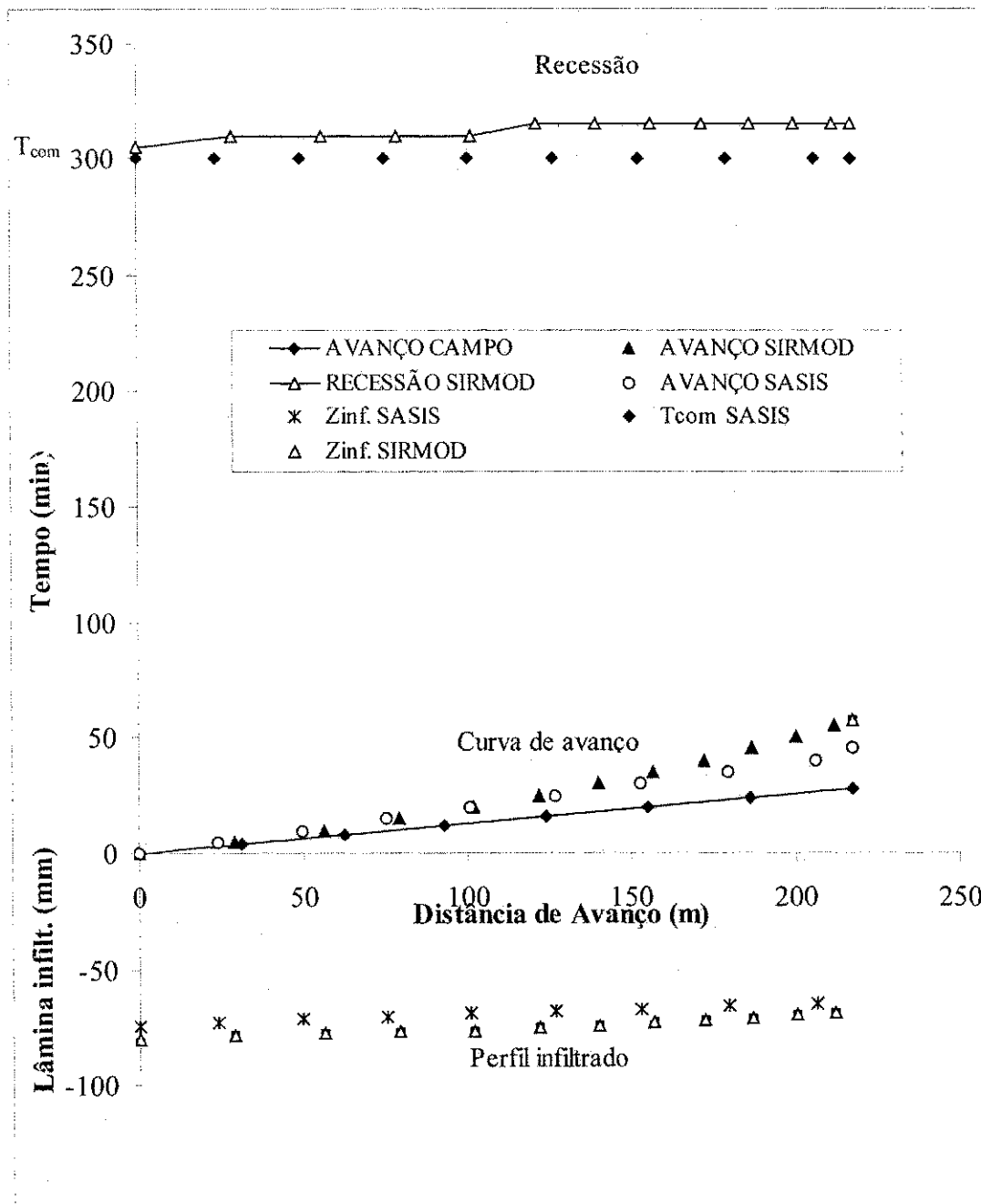


Figura 4.7. Curvas de avanço medida em campo e simulada pelos modelos SIRMOD e SASIS; recessão simulada pelo SIRMOD e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SISRMO e SASIS (GUFCQ, comprimento 217 m)

Para os dados DEMO1, a comparação da simulação foi feita apenas entre os dois modelos, uma vez que não se disponha dos dados de campo, o tempo de avanço simulado pelo modelo SASIS foi de 130 min contra 101,6 min, dado pelo SIRMOD (Tabela 4.1), cuja diferença entre as duas simulações foi de 28,4 min, correspondendo à variação de 28%; verifica-se que, ao longo de toda a área, a curva de avanço simulada pelo SASIS apresenta valores maiores que os da curva do SIRMOD.

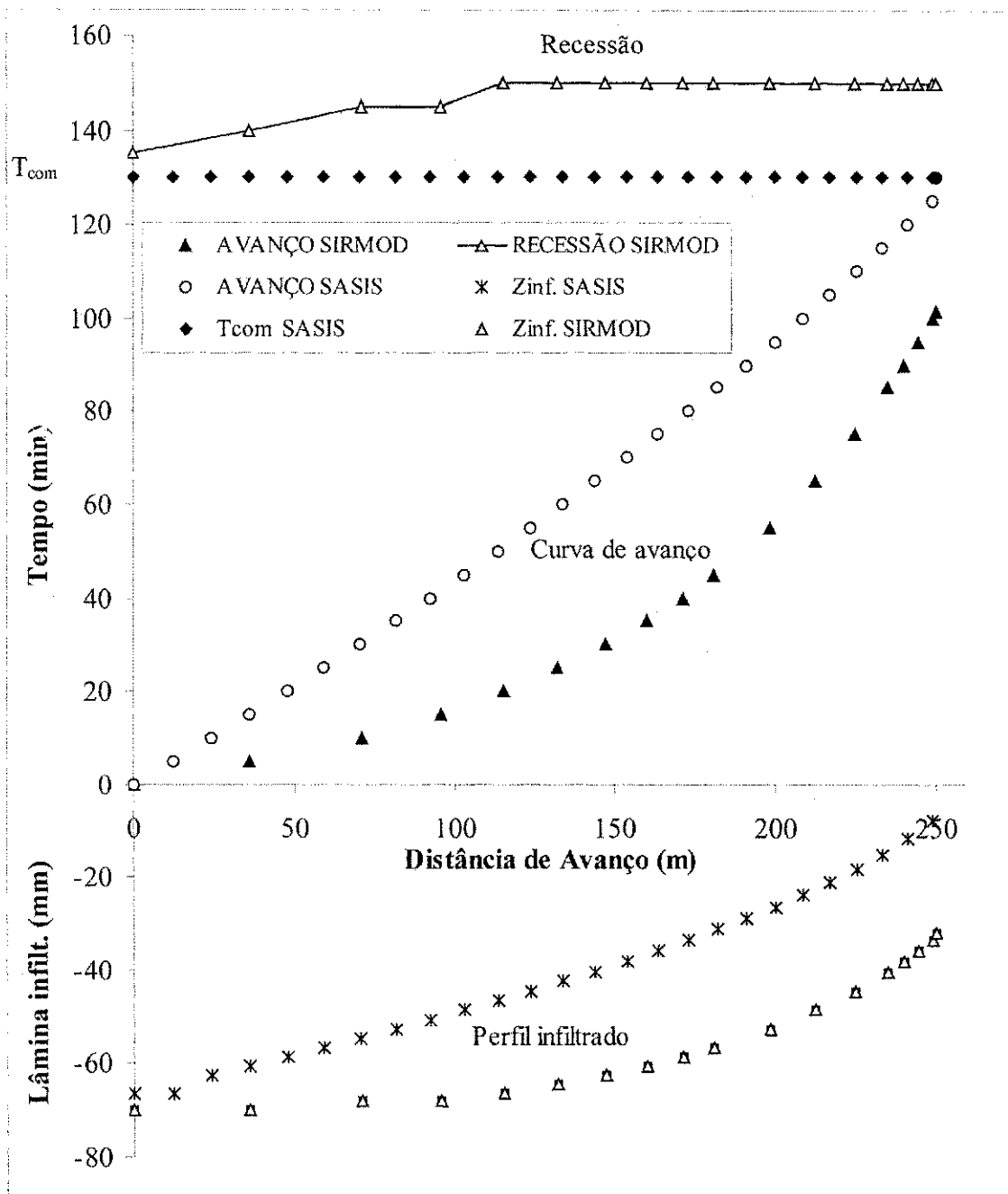


Figura 4.8. Curvas de avanço simulada pelos modelos SIRMÓD e SASIS; recessão simulada pelo SIRMÓD e tempo de corte (T_{com}) admitido pelo SASIS; e perfis de infiltração calculados para o SIRMÓD e SASIS (DEMO1, comprimento 250 m)

Na maioria dos exemplos, os tempos de avanços simulados se assemelham mais aos valores medidos em campo nos primeiros 50% do comprimento do sulco; isto ocorre provavelmente porque a partir desse trecho o avanço vai-se tornando mais lento, devido ao efeito da infiltração d'água na velocidade do fluxo que, diminuída ao longo do sulco, aumenta assim o grau de não linearidade na curva de avanço. É bem mais fácil

simular uma reta que uma curva. No restante da área, a diferença entre os valores simulados e os medidos cresce a medida em que se aproxima do final e os valores simulados pelos dois modelos não apresentam grandes diferenças com relação aos medidos em campo. De acordo com Levien (2001), o avanço é muito mais rápido no início que no final do sulco, em virtude da infiltração contribuir para redução na velocidade de avanço da água ao longo do sulco. Segundo o autor, a uniformidade de irrigação depende da uniformidade do tempo de oportunidade de infiltração da água nos diferentes pontos da parcela. Por sua vez, esta uniformidade é maior quanto mais rápido for o tempo de avanço.

Ante o exposto, constatou-se que em cinco exemplos (PISG1, PISG2, PISG4, AMALGACQ e GUFCQ), o tempo de avanço no final da área simulado pelo SASIS se aproximou mais dos valores medidos em campo contra dois exemplos (PISG3 e KWF) simulados pelo SIRMOD. Para os exemplos estudados, a maior diferença percentual entre o tempo de avanço medido e o simulado no final da área (Tabela 4.1) pelo SASIS, foi de 60,7% (GUFCQ) e pelo SIRMOD, 104,6% (GUFCQ).

A diferença entre os dados observados e os simulados pelos modelos apresentados (SASIS e SIRMOD) depende decisivamente da precisão e da representatividade dos parâmetros de entrada requeridos, ou seja do grau de controle conseguido quando da realização dos ensaios de campo, como seção transversal, declividade, rugosidade e principalmente das constantes da equação de infiltração d'água no solo. Os resultados apresentados na Tabela 4.1 e nas figuras acima constata a viabilidade da aplicação do modelo desenvolvido (SASIS) nesta pesquisa para simulação e racionalização da irrigação por sulco com fluxo contínuo, uma vez que as simulações feitas com o modelo SASIS assemelham-se bastantes aos valores medidos em campo e apresenta grande facilidade de operação, diferenciando-se do modelo SIRMOD, que trabalha no DOS, apresentando integração total ao Windows em todas as suas versões, permitindo ao usuário, tanto a entrada de dados de maneira clara e prática como também permite mudanças em alguns parâmetros do modelo, ajustando-se a realidade de campo.

4.3. Simulação da recessão

Nas Figuras 4.1 a 4.8 vê-se que, de modo geral, as curvas de recessão simuladas pelo SIRMOD e os valores admitidos pelo SASIS, apresentam pequenas diferenças. Quando se analisam os tempos de recessão no início e no final da área,

simulados pelo SIRMOD constata-se, para os oito conjuntos de dados, pequenas variações ao longo do sulco, tendo para o KWF ocorrida a menor diferença (3,3%) e, para o PISG3, a maior (19,3%), o que pode ser comprovado com os valores apresentados na Tabela 4.2, indicando que a fase de recessão na irrigação por sulco é praticamente linear. Quando se comparam os tempos de recessão no início da área simulados pelo SIRMOD com o valor admitido pelo SASIS, tem-se que a menor diferença foi de 1% (AMALGACQ) e a maior, 9,8% (PISG2) (Tabela 4.2) superior para o SIRMOD e, para o final da área, a menor e a maior diferença foi de 4,4 (KWF) e 25,2% (PISG3).

Bernardo (1995) recomenda que em irrigação por sulco se deve considerar o tempo de recessão igual ao tempo de corte da irrigação, uma vez que neste sistema de irrigação o desaparecimento da água da superfície do solo se dá quase que de imediato.

Tabela 4.2. Tempo de recessão simulado pelo SIRMOD e tempo de corte admitido pelo SASIS, para diferentes condições de campo

CONJUNTO DE DADOS	SIRMOD RECESSÃO (min)			SASIS TEMPO DE CORTE (min)	SIRMOD/SASIS	
	Início do Sulco	Final do Sulco	$\Delta(\%)*$		$\Delta(\%)^1$	$\Delta(\%)^2$
PISG1	95	105	10,5	90	5,6	16,7
PISG2	126,3	143,8	13,9	115	9,8	25
PISG3	32,1	38,3	19,3	30,6	4,9	25,2
PISG4	91	105	15,4	86	5,8	22
KWF	455	470	3,3	450	1,1	4,4
AMALGACQ	505	535	5,9	500	1,0	7
GUFCQ	305	315	3,3	300	1,7	5
DEMO1	135	150	11,1	130	3,8	15,4

$\Delta(\%)*$ – variação percentual entre o tempo de recessão simulado no início e no final do sulco; $\Delta(\%)^1$ – variação percentual entre a recessão simulada pelo SIRMOD no início do sulco e o tempo de corte admitido pelo SASIS; $\Delta(\%)^2$ – variação percentual entre a recessão simulada pelo SIRMOD no final do sulco e o tempo de corte admitido pelo SASIS

4.4. Perfil de infiltração

Com relação às curvas simuladas pelos dois modelos, que representam o perfil de água infiltrado no sulco nota-se haver nas Figuras 4.1 a 4.8, grande similaridade nos exemplos estudados, principalmente para os dados PISG2, PISG2, GUFCQ e KWF

ocorrendo, no restante dos conjuntos de dados, pequena diferença; a grande similaridade nos exemplos acima ocorreu devido à existência de pequena diferença nos tempos de avanço e/ou nos tempos de recessão. Para os exemplos em que não ocorreu similaridade (PISG3, PISG4, DEMO1 e AMALGACQ) foi maior a variação entre a simulação pelos dois modelos do avanço e da recessão contribuindo, desta forma, para maiores diferenças nos volumes infiltrados prognosticados. Segundo Walker (2001) nenhum outro fator é tão significativo na simulação da irrigação por superfície, como a infiltração, e tão difícil de ser medida ou prognosticada com confiabilidade e precisão. Ante o exposto, observa-se que o avanço e o perfil de infiltração estimado pelo modelo SASIS apresentam resultados satisfatórios comparados aos valores de avanço medido em campo e aos valores simulados do avanço e do perfil de infiltração pelo modelo SIRMOD.

4.5. Balanço de volume

Para se avaliar um sistema de irrigação por sulco deve-se, quantificar certas variáveis que servem para o prognóstico de determinados parâmetros de eficiência e uniformidade do sistema de irrigação; primeiro torna-se oportuno conhecer o volume total de água aplicado no sulco, os volumes infiltrados, armazenados na zona radicular, escoados no final do sulco (runoff) e percolados além da zona radicular.

Os balanços de volume calculados pelos dois modelos estão apresentados na Tabela 4.3, na qual se nota que em todos os dados de campo avaliados, os volumes de água aplicados são iguais, como se esperava, com exceção para o dados PISG4, onde o SIRMOD simulou um volume aplicado superior ao real, visto que os dois modelos simularam as fases da irrigação, para cada conjunto de dados de campo e para um mesmo tempo de aplicação d'água e vazão; caso contrário, haveria grande inconsistência em um dos modelos. Quanto ao volume infiltrado verifica-se, para os conjuntos de dados PISG1, PISG2, KWF, GUFCQ, que os valores se assemelham, com variações de 2,9, 0,8, 3, 6,2% (Tabela 4.3), respectivamente, justificando a semelhança entre os valores prognosticados pelos dois modelos das eficiências de aplicação e armazenamento d'água ocorrida para tais exemplos (Tabela 4.4); para os outros dados de campo, constata-se diferença entre os volumes infiltrados simulados pelo SIRMOD, variando de 24 (AMALGACQ) a 49,4% (DEMO1), a maior com relação aos volumes infiltrados simulados pelo SASIS.

Tabela 4.3. Balanço de volume d'água aplicado; infiltrado; escoado; percolado e armazenado na zona radicular calculado pelos modelos SIRMOD e SASIS, em m³

CONJUNTO DE DADOS	SIRMOD					SASIS				
	Vr	Vz	Vro	Vdp	Vrz	Vr	Vz	Vro	Vdp	Vrz
PISG1	7,182	5,850	1,382	0,312	5,538	7,182	6,019	1,163	0,435	5,584
PISG2	10,143	10,144	0,000	5,103	5,041	10,143	10,233	0,079	5,392	4,831
PISG3	2,827	2,374	0,483	0,975	1,399	2,827	1,745	1,082	0,575	1,170
PISG4	6,102	5,254	0,928	2,954	2,300	5,831	4,059	1,772	1,828	2,230
KWF	40,500	35,710	4,950	3,836	31,874	40,500	34,640	5,860	4,200	30,430
AMALGACQ	54,000	41,433	12,775	5,145	36,288	54,000	33,398	20,600	1,620	31,770
GUFCQ	23,400	16,366	7,191	5,508	10,858	23,400	15,417	7,983	4,968	10,448
DEMO1	15,600	15,235	0,575	5,298	9,937	15,600	10,192	5,408	2,128	8,063

Vr - volume total de água aplicado no sulco; Vz - volume de água infiltrado; Vro - volume de água escoado no final do sulco; Vdp - volume de água percolado além da zona radicular; Vrz - volume de água armazenado na zona radicular

Em relação ao volume escoado simulado pelos dois modelos para os 8 exemplos estudados observa-se, para os dados PISG1, KWF e GUFCQ, que os valores simulados pelos dois modelos se assemelham e nos 5 restantes os valores simulados pelo SASIS são maiores que os simulados pelo SIRMOD (Tabela 4.3). Para os volumes percolados vê-se semelhança para os exemplos PISG1, PISG2, KWF e GUFCQ, enquanto nos outros dados os valores simulados pelo SIRMOD superam os valores do SASIS. Provavelmente, o fato de que para todos os exemplos estudados a soma dos volumes infiltrados e escoados simulado pelo SIRMOD superou a soma do volume total aplicado tenha contribuído para essas diferenças, com exceção para os exemplos PISG1 e PISG2, em que tanto as taxas de percolação como os volumes infiltrados se assemelham. Enfatiza-se que isto não ocorreu com o modelo proposto (SASIS); para os dados de campo AMALGACQ, observa-se grande diferença entre os volumes percolados simulados pelos dois modelos com valor superior para o SIRMOD.

Geralmente, o SIRMOD simula um volume infiltrado superior ao simulado pelo SASIS, uma vez que o valor do tempo de recessão simulado pelo SIRMOD supera o tempo de corte admitido pelo SASIS; sobretudo para os dados de AMALGACQ, os

reflexos dessas diferenças no cálculo da eficiência de aplicação d'água foram relativamente pequenos, com pequena variação de 5,1% (Tabela 4.4), justificada pela grande diferença (68,5%) nos valores da taxa de percolação simulados, que foi compensada por um volume menor de água escoado simulado pelo modelo SIRMOD, com diferença de 38% inferior (Tabela 4.3).

No que se refere ao volume de água armazenado na zona radicular, verifica-se semelhança entre os valores simulados pelos dois modelos, em 5 dos exemplos estudados, com variação de 0,8 (PISG1) a 4,7% (KWF); nos 3 exemplos restantes (PISG3, AMALGACQ e DEMO1) a variação foi de 19,6, 14,2 e 23%, respectivamente, superior para o SIRMOD (Tabela 4.3). Para esses exemplos, a diferença entre as eficiências de armazenamento simuladas foi de 16,4, 7,6 e 18,7%, respectivamente, também superior para o SIRMOD (Tabela 4.4), mostrando coerência na simulação de ambos os modelos.

Enfatiza-se que o modelo SIRMOD não imprime, em seu arquivo de output, os volumes percolado e armazenado na zona radicular, muito embora esses parâmetros possam ser calculados pelo usuário, através de informações fornecidas por este modelo, sobre a eficiência de aplicação, volume total aplicado e volume escoado; no entanto, o modelo SASIS fornece ao usuário todos os componentes do balanço de volume, disponibilizando-o prontamente em seu arquivo de output informações mais completas que irão subsidiá-lo em tomadas de decisão no manejo da irrigação por sulco com fluxo contínuo, objetivando aprimoramento de seu desempenho.

Nos exemplos PISG1, PISG2 e KWF, apesar da diferença entre os tempos de avanço no final do sulco simulados pelos dois modelos ter sido elevada, as diferenças nos volumes infiltrados prognosticados pelos modelos foram pequenas (respectivamente 2,8, 0,8 e 3%); isto aconteceu porque, sem dúvida, ao longo do sulco (principalmente nos primeiros 50%) as curvas de avanço se aproximaram; já no caso do exemplo AMALGACQ, a diferença acentuada entre os volumes infiltrados prognosticados pelos dois modelos se deveu às diferenças acentuadas no tempo de avanço ao longo da área, com valores subestimados pelo SIRMOD acarretando, portanto, maior tempo de contato da água com o solo (tempo de oportunidade de infiltração d'água) e, conseqüentemente, maiores lâminas infiltradas, o que comprova mais uma vez a veracidade nos valores simulados pelo SASIS.

Segundo Walker & Skogerboe (1987), Azevedo (1992) e Levien (2001) a fase de avanço é a mais importante da irrigação por sulco com fluxo contínuo, porque a maior contribuição para as variações no tempo de oportunidade de infiltração ao longo da área advém das variações no tempo de avanço; uma vez na irrigação por sulco, a fase de recessão é curta e seu tempo ao longo do sulco apresenta pequena variação, podendo até mesmo, ser negligenciada esta fase. Chama-se a atenção para o fato de que variações no tempo de oportunidade de infiltração ao longo da área têm efeito tanto na uniformidade de distribuição da lâmina aplicada ao longo da área como nas perdas por percolação. Na verdade, a fase de avanço é a que mais contribui para as perdas por percolação, muito mais que o tempo de aplicação d'água, devendo-se dar-lhe atenção especial, tanto no dimensionamento quanto no manejo do sistema de irrigação por sulco e no desenvolvimento de pesquisas através das quais se objetiva seu monitoramento.

4.6. Parâmetros de desempenho

Por mais de quatro décadas, indicadores de desempenho dos sistemas de irrigação chamados, costumeiramente, de eficiências, foram diferentemente definidos para medir um ou outro fator de desempenho. Segundo Levien (1998) tem-se proposto e utilizado, ao longo dos anos, um grande número de índices para se analisar os resultados da irrigação.

Uma contribuição importante foi fornecida pelo Comitê de Irrigação de On Farm, da Divisão de Irrigação e Drenagem da Sociedade Americana de Engenheiros Civis (ASCE, 1978) que apresenta uma proposta muito concisa acerca de uniformidade e eficiência, a qual tem contribuído, de certa forma, para a possibilidade de má interpretação e confusão sobre os conceitos utilizados.

Burt et al. (1997) apresentaram um trabalho sobre indicadores de desempenho da irrigação, cuja intenção original foi explicar, de forma clara, as definições da ASCE (1978) tornando-se, em alguns casos, necessárias algumas modificações nas equações, de maneira que a eficiência de irrigação (EI), uniformidade de distribuição (UD) e a eficiência de aplicação (Ea) ficassem bem definidas. O comitê da ASCE tem-se mostrado relutante para redefinir tais conceitos, devido à sua longa história de uso, mas reconhece a necessidade de melhorar as definições a fim de evitar confusão e erros matemáticos; além disso, dois documentos de Clemmens & Burt (1997) e Clemmens &

Solomon (1997) foram escritos para fornecer detalhes mais analíticos em métodos estatísticos para computar eficiência de irrigação, uniformidade de distribuição e suas precisões.

O programa SASIS aplica a metodologia de Burt et al. (1997) para avaliar o desempenho do sistema de irrigação por sulco com fluxo contínuo, cujos parâmetros, calculados pelos modelos SASIS e SIRMOD, são apresentados na Tabela 4.4. Verifica-se similaridade nos valores dos parâmetros simulados pelos dois modelos.

Para a eficiência de aplicação, a menor diferença obtida entre os modelos foi de 2,1% (para os dados de campo PISG2); enquanto a maior diferença obtida foi de 12,0% (para os dados de campo DEMO1), cujos valores maiores foram simulados pelo SIRMOD. Observa-se que o modelo proposto considera o tempo de recessão igual ao tempo de corte do fluxo d'água, o que faz com que o tempo de oportunidade de infiltração da água no sulco seja menor para este modelo, resultando num volume menor infiltrado; já o modelo SIRMOD o tempo de recessão simulado supera o tempo de corte da irrigação, contribuindo desta forma para maior tempo de oportunidade de infiltração da água, conseqüentemente maior volume infiltrado, no entanto, o fato dessas diferenças terem sido pequenas reforça a validade da hipótese de se negligenciar a fase de recessão na irrigação por sulco com fluxo contínuo.

Para a eficiência de armazenamento os valores também se assemelham, sendo a menor diferença 2,6% (para os dados de campo PISG1) e a maior 18,7% (para os dados de campo DEMO1) (Tabela 4.4), superior para os valores simulados pelo SIRMOD. Para a uniformidade de distribuição o modelo proposto simulou valores superiores em cinco exemplos contra três simulados pelo SIRMOD. Nos exemplos em que o SASIS apresenta maiores valores, a maior diferença foi 22,5% (para os dados de campo PISG2) e a menor 6,7% (para os dados de campo GUFQC) enquanto nos exemplos em que o SIRMOD apresentou valores superiores, a maior diferença foi de 27,7% (para os dados de campo DEMO1) e a menor 3,3% (para os dados de campo AMALGACQ) (Tabela 4.4). Verifica-se que, nos exemplos em que o modelo SIRMOD simulou valor maior para a eficiência de armazenamento, que o SASIS apresentou maior uniformidade na distribuição da água, devendo-se este fato, provavelmente, à hipótese de um tempo de recessão igual ao longo de toda a área, assumida no modelo proposto.

Tabela 4.4. Comparação entre os parâmetros de desempenho da irrigação por sulco com fluxo contínuo prognosticados pelos modelos SASIS e SIRMOD, para diferentes condições de campo

PARÂMETROS DE DESEMPENHO															
CONJUNTO DE DADOS	SIRMOD								SASIS						
	Zreq (m)	Ea (%)	Er (%)	UD (%)	UDa (%)	TE (%)	TP (%)	Zf (m)	Ea (%)	Er (%)	UD (%)	UDa (%)	TE (%)	TP (%)	Zf (m)
PISG1	0,090	79,9	95,2	87,6	66,0	19,2	0,9	0,0571	77,7	92,6	100	92,6	16,2	6,1	0,0797
PISG2	0,060	49,7	100	77,5	56,4	0	50,3	0,0675	47,6	95,8	100	84,7	0,2	53,2	0,1031
PISG3	0,020	49,5	100	86,2	73,1	17,1	33,4	0,0247	41,4	83,6	75,9	36,2	36,5	19,3	0,0088
PISG4	0,020	37,7	100	83,4	70,9	15,2	47,1	0,0322	38,3	97,0	96,6	63,8	30,4	31,3	0,0221
KWF	0,090	78,7	98,4	85,1	70,6	12,2	9,1	0,0696	75,1	93,9	100	86,5	14,5	10,4	0,0814
AMALGACQ	0,090	67,2	100	96,9	94,6	23,9	8,9	0,0957	62,1	92,4	93,6	83,9	33,2	4,7	0,0737
GUFQC	0,050	46,4	100	93,3	85,6	30,7	22,9	0,0644	44,7	96,3	100	93,5	34,1	21,2	0,0651
DEMO1	0,040	63,7	99,4	74,9	53,0	3,7	32,6	0,0320	51,7	80,7	47,2	0	34,7	13,6	0,0077

Ea - eficiência de aplicação d'água no sulco; Er - eficiência de armazenamento de água; UD - uniformidade de distribuição; Uda - uniformidade de distribuição absoluta; TE - taxa de escoamento; TP - taxa de percolação; Zreq - lâmina requerida de projeto; e Zf - lâmina infiltrada no final do sulco

Quanto à taxa de escoamento, nota-se na Tabela 4.4 que os valores simulados pelo SASIS praticamente superam, em todos os exemplos, os do SIRMOD, cuja menor diferença é de 0,2% (para os dados de campo PISG2) e a maior 31% (para os dados de campo DEMO1); nos demais exemplos ocorreu pequena diferença entre os valores simulados, enquanto para a taxa de percolação foi notória a similaridade em cinco exemplos estudados (PISG1, PISG2, KWF, AMALGACQ e GUFCQ), para os quais a menor diferença entre os valores simulados pelos dois modelos foi de 1,3% (KWF) e a maior de 5,2% (PISG1). Nos exemplos PISG3, PISG4 e DEMO1, as diferenças entre os valores simulados foram, respectivamente, de 14,1, 15,8 e 19%, superior para o SIRMOD; para esses mesmos exemplos ocorreram as maiores diferenças nos volumes infiltrados 36, 29 e 49,5%, respectivamente, nos demais exemplos às diferenças variaram entre 0,8 a 6,2%, com exceção de AMALGAC, que a apresentou 24% superior para o SIRMOD.

Para o exemplo PISG3, através do qual se registrou a maior variação no tempo de recessão ao longo da área (19,3%), a diferença entre os valores prognosticados pelos dois modelos da eficiência de aplicação foi de 8,1%, superior para o SIRMOD; neste exemplo, o modelo SASIS simulou tempo de avanço para o final da área, superior em 20% ao avanço medido em campo, enquanto pelo SIRMOD, em 2,5% inferior (Tabela 4.1); este fato explica, portanto, a diferença de 36% (Tabela 4.3) superior para o modelo SIRMOD no volume infiltrado, refletindo nos valores da eficiência de aplicação e na eficiência de armazenamento, respectivamente com diferenças de 8,1 e 16,4% superior para o modelo SIRMOD (Tabela 4.4) mostrando, portanto, coerências na simulação de ambos os modelos. Observa-se, então, que a diferença entre as curvas de recessão para os exemplos estudados, refletiu pouco nos volumes prognosticados pelos dois modelos e, conseqüentemente, no desempenho da irrigação, validando assim a hipótese de recessão constante feita nesta pesquisa.

Quando se analisa a lâmina infiltrada no final da área, vê-se que o modelo SIRMOD simulou uma lâmina superior à de projeto, em cinco exemplos estudados (PISG2, PISG3, PISG4, AMALGACQ e GUFCQ) (Tabela 4.4), resultando em eficiência de armazenamento de 100% numa condição de irrigação excessiva, mas com pequenas perdas por percolação, ou seja, aproximando-se a uma condição de irrigação adequada. Nos outros três conjuntos de (PISG1, KWF e DEMO1) a lâmina foi inferior, aproximando-se bastante da condição de irrigação adequada, tendo sido a menor eficiência de

armazenamento de 95,2%. No modelo SASIS aconteceu o inverso, isto é, em três exemplos (PISG2, PISG4 e GUFQC) simulou lâmina superior, porém com pequena condição de irrigação excessiva e nos outros cinco exemplos (PISG1, PISG3, KWF, AMALGACQ e DEMO1); em ambas as situações houve uma aproximação também da condição de irrigação adequada. Provavelmente, o SIRMOD prognosticou uma condição de irrigação excessiva para a maioria das condições de campo estudadas devido ao fato de que este modelo geralmente simula um volume infiltrado maior que o SASIS acontecendo, algumas vezes, da soma do volume infiltrado com o escoado (simulados) ser até mesmo maior que o aplicado, o que é uma inconsistência. Esses resultados mostram que a escolha do tempo de aplicação d'água para cada condição de campo estudada, foi adequada. Deve-se lembrar, ainda, que para uma específica condição de campo a simulação pelos dois modelos foi feita considerando-se o mesmo tempo de aplicação d'água.

4.7. Vazão ótima

As curvas geradas pelo modelo proposto para a performance da irrigação em função da vazão de adução, são apresentadas nas Figuras 4.9 a 4.15. Vê-se claramente, em todas as condições de campo estudadas, que a vazão aplicada no sulco exerce influência nos parâmetros de desempenho do sistema, quando uma perda d'água (percolação ou escoamento superficial) cresce e a outra diminui com a diminuição ou aumento da vazão. Observa-se que, quando a vazão aumenta, as perdas por percolação diminuem e as por escoamento superficial aumentam; o contrário acontece quando a vazão diminui; desta forma, para a vazão máxima não erosiva, as perdas por escoamento são máximas e as por percolação mínimas; enquanto para a vazão mínima, isto é, aquela que garante que a água chegue até ao final da área, se dá o oposto; além disso, as perdas por escoamento são bem mais sensíveis às variações de vazão em relação às perdas por percolação, fato este observado através das inclinações das curvas. Para os casos estudados, ocorreu dominância das perdas por escoamento sobre as perdas por percolação, ou seja, quando as perdas por escoamento são maiores que as perdas por percolação (o que aconteceu na maior faixa de vazão) o valor absoluto da diferença entre essas perdas é bem maior que quando as perdas por percolação superam as por escoamento; conseqüentemente, isto resulta num efeito maior das perdas por escoamento no valor da eficiência de aplicação, fazendo com que a curva desse parâmetro (eficiência de aplicação) apresente praticamente o mesmo

comportamento da curva das perdas por percolação, uma vez que estas afetam bem menos a eficiência de aplicação d'água na irrigação por sulco. Observa-se, ainda, que em todos os casos estudados, quando a vazão aumenta, a eficiência de aplicação diminui, reforçando mais ainda que este parâmetro é bem mais afetado pelas perdas por escoamento que por percolação.

Constata-se, nas Figuras 4.9 a 4.15, que as curvas que representam as taxas de escoamento e de percolação se interceptam para um dado valor de vazão, indicando uma mudança de efeito maior ou menor dessas perdas na eficiência de aplicação d'água a partir deste valor. Observa-se que quando há um equilíbrio entre as perdas de água por escoamento e por percolação, ou seja, quando elas estão balanceadas ao ponto de não haver, então, predominância de uma sobre a outra, conseguem-se altos índices de eficiência de aplicação d'água na irrigação por sulco; é o que se constata para os dados de campo PISG1 (Figura 4.9), KWF (Figura 4.10), GUFCQ (Figura 4.11) e DEMO1 (Figura 4.12). Para o PISG1, as perdas por escoamento e percolação foram, respectivamente, de 10,23 e 7,35%, e a eficiência de aplicação de 82,42%; para o KWF as perdas por escoamento e percolação foram respectivamente, de 4,17 e 14,08%, e a eficiência de aplicação, 81,75%; para os dados de campo de GUFCQ as perdas por escoamento foram de 1,14%, as perdas por percolação 3,92% e a eficiência de aplicação 93,94%; e para o DEMO1, as perdas por escoamento e percolação foram, respectivamente, de 2,8 e 13,45%, e a eficiência de aplicação de 83,75%; entretanto, nos dados de campo PISG2 (Figura 4.13), PISG3 (Figura 4.14) e PISG4 (Figura 4.15), como não foi possível se conseguir, para as condições de campo reinantes nesses dados, valores pequenos para as perdas por escoamento e percolação, as eficiências de aplicação máximas que puderam ser obtidas foram, respectivamente, de 50,57, 48,51 e 34,28%. Consta-se, para todas as condições de campo estudadas, que a vazão ótima corresponde a um valor próximo da vazão mínima, porque já se comentou, antes, que as perdas por escoamento afetam muito mais a eficiência de aplicação que as por percolação; desta forma e se minimizando as perdas por escoamentos estar-se-á conseqüentemente, maximizando a eficiência de aplicação.

Para PISG1 (Figura 4.9, Tabela 4.5) a vazão ótima está, também, próxima da vazão mínima; o valor prognosticado pelo modelo para a vazão ótima foi de $1,05 \text{ L s}^{-1}$ e, para a vazão máxima, $2,33 \text{ L s}^{-1}$. Para as referidas vazões, vê-se que as perdas por escoamento foram, respectivamente, 10,23 e 51,78%, enquanto as por percolação 7,35 e

4,51%, resultando num prognóstico da eficiência de aplicação para a vazão ótima, de 82,42%, e para a vazão máxima, 43,71%. Neste exemplo, as taxas de escoamento e percolação são pequenas com pequena discrepância entre seus valores (com diferença entre elas de apenas 2,88%) e grande discrepância para a vazão máxima (com diferença expressiva de 47,27%) apresentando, então, uma diferença acentuada de 38,71% na eficiência de aplicação. Constata-se que a taxa de escoamento é muito afetada pela vazão, o que não ocorre com a taxa de percolação, fato este justificado ainda pelo tipo de solo (franco argilo arenoso), que apresenta baixa taxa de infiltração (k igual 0,03781 e f_o igual 0,000152). Para a vazão praticada pelo irrigante em campo, os valores prognosticados para a eficiência de aplicação, taxa de escoamento e taxa de percolação foram, respectivamente, 77,74, 16,20 e 6,06%, demonstrando que as perdas por percolação e escoamento apresentam valores razoavelmente pequenos, com diferença de 10,14% entre elas. Os resultados demonstram que, então, que quanto menor a diferença entre essas perdas, consegue-se melhor desempenho do sistema de irrigação, uma vez que para a vazão ótima a diferença foi 2,88%, resultando numa eficiência de aplicação de 82,42%, enquanto para a vazão de praticada pelo irrigante foi de 77,74%; entretanto, este valor se aproximou do valor máximo que se pode conseguir para estas condições de campo, indicando que o irrigante fez escolha da vazão que se aproximou do valor ótimo.

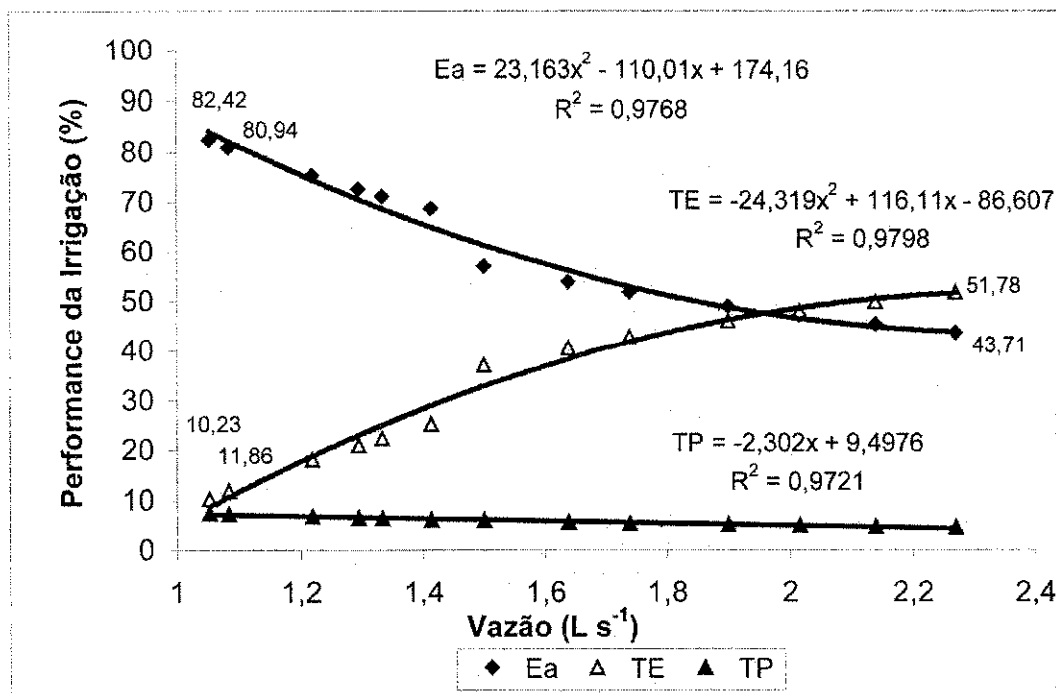


Figura 4.9. Performance da irrigação função da vazão de entrada (PISG1), vazão ótima 1,05 L s⁻¹, Ea - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação

Tabela 4.5. Performance da irrigação por sulco aberto com fluxo contínuo, função da vazão de entrada, prognosticado pelo modelo SASIS, para três condições de vazão

CONJUNTO DE DADOS	PERFORMANCE DA IRRIGAÇÃO (%)												
	Vazão ($L s^{-1}$)				Vazão ótima			Vazão máxima			Vazão praticada		
	Q_{min}	Q_{otm}	Q_{max}	Q_{pro}	Ea	TE	TP	Ea	TE	TP	Ea	TE	TP
PISG1	0,90	1,05	2,33	1,33	82,42	10,23	7,35	43,71	51,78	4,51	77,74	16,20	6,06
PISG2	1,60	1,66	5,92	1,47	50,57	0,46	48,96	13,97	70,33	15,70	47,62	0	51,16
PISG3	0,60	0,64	1,21	1,54	34,28	0,78	64,94	12,66	60,45	26,88	44,18	36,54	19,28
PISG4	0,60	0,77	2,02	1,13	48,51	2,95	48,54	18,72	58,53	22,75	38,28	30,40	31,35
KWF	1,50	1,62	3,01	1,50	81,75	4,17	14,08	54,55	43,66	1,79	75,14	14,47	10,39
GUFCQ	0,76	0,79	1,79	1,30	93,94	2,14	3,92	44,57	53,04	2,38	44,65	34,12	21,23
DEMO1	0,81	0,84	1,77	2,00	83,75	2,80	13,45	55,02	36,74	8,23	51,69	34,67	13,64

Q_{min} - vazão mínima, $L s^{-1}$; Q_{otm} - vazão ótima, $L s^{-1}$; Q_{max} - vazão máxima, $L s^{-1}$; Q_{pro} - vazão praticada pelo irrigante, $L s^{-1}$; Ea - eficiência de aplicação; TE - taxa de escoamento; e TP - taxa de percolação

Para o exemplo KWF (Figura 4.10 e Tabela 4.5) o modelo prognosticou um valor de 1,62 L s⁻¹ para a vazão ótima, próxima da mínima, e de 3,01 L s⁻¹ para a vazão máxima. Para tais vazões, tem-se que as perdas por escoamento foram, respectivamente, 4,17 e 43,66%, enquanto as por percolação foram 14,08 e 1,79%; desta forma, a eficiência de aplicação prognosticada pelo modelo para a vazão ótima foi de 81,75% e, para a vazão máxima, de 54,55%. Verifica-se, na Tabela 4.5, que para a vazão ótima as taxas de escoamento e percolação apresentam pequena diferença entre seus valores, com diferença de apenas 9,91% entre elas alcançando-se, então, elevado índice de desempenho do sistema de irrigação. Com certeza, a baixa taxa de infiltração d'água (*k* igual a 0,0088 e *f*_o igual a 0,00017) neste solo (franco silte argiloso) contribui, sobremaneira, para se ter valores pequenos para essas perdas. Para a vazão praticada pelo irrigante os valores prognosticados para a eficiência de aplicação, taxa de escoamento e taxa de percolação foram, respectivamente, de 75,14, 14,47 e 10,39% indicando, portanto, valores próximos aos prognosticados para a vazão ótima, mostrando que houve boa escolha na vazão de praticada pelo irrigante.

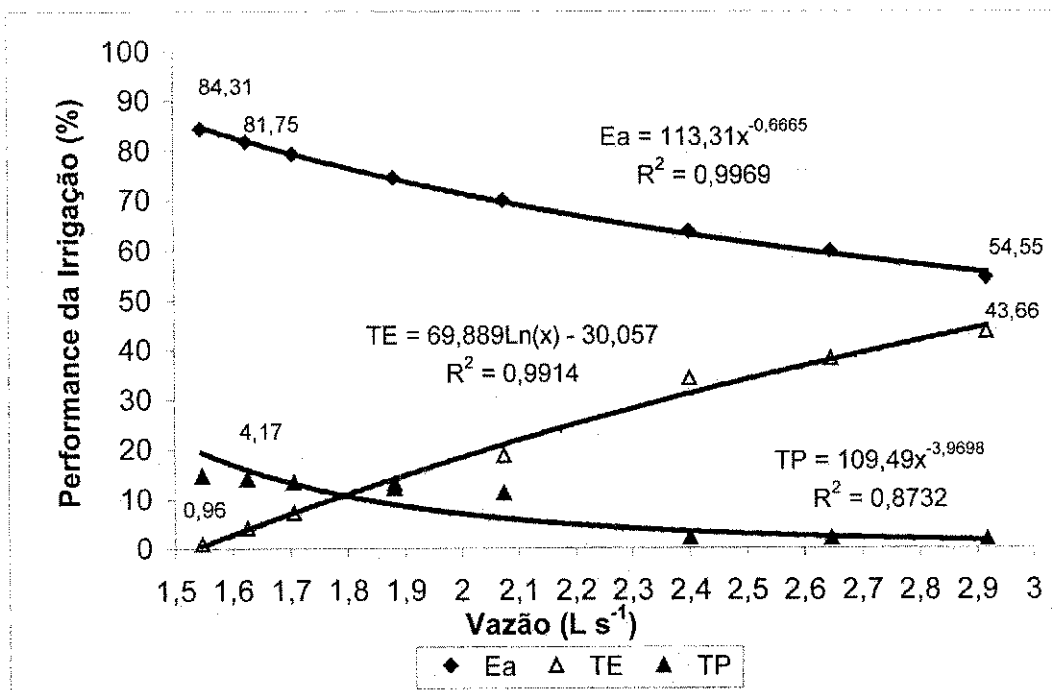


Figura 4.10. Performance da irrigação função da vazão de entrada (KWF), vazão ótima 1,6248 L s⁻¹, Ea - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação

Para os dados de campo GUFCCQ (Figura 4.11) vê-se que a curva que representa a taxa de escoamento apresenta, também, alta inclinação, mostrando grande variação deste índice de desempenho com a vazão; já a curva que indica a taxa de percolação, tem pequena inclinação, demonstrando que, nessas condições de campo, a mesma foi pouco afetada pela vazão. Quanto à curva que representa a eficiência de aplicação, verifica-se que ela apresenta, ainda inclinação idêntica à taxa de escoamento, em sentido oposto. Conforme a Tabela 4.5, o valor prognosticado pelo modelo SASIS para a vazão ótima, foi $0,79 \text{ L s}^{-1}$ e de $1,79 \text{ L s}^{-1}$ para a vazão máxima. Através dessas vazões, observa-se que as perdas por escoamento foram, respectivamente, de 2,14 e 53,04%, enquanto as perdas por percolação foram de 3,92 e 2,38%; a eficiência de aplicação prognosticada pelo modelo para a vazão ótima foi a mais alta dentre os exemplos estudados, 93,94%, contra 53,04% para a vazão máxima e, mais uma vez, que o alto nível de desempenho da irrigação por sulco com fluxo contínuo ocorre quando as perdas por escoamento e percolação apresentam valores mínimos e próximos. Neste exemplo, a diferença entre essas perdas para a vazão ótima foi de apenas 1,78%, mostrando que, quanto menor forem essas perdas e quanto menor for a diferença entre elas, maior será a eficiência de aplicação d'água na irrigação por sulco; Além disso quando se aplicou a vazão ótima, tanto a perdas por escoamento como as perdas por percolação foram baixas, resultando em alta eficiência de aplicação d'água e, quando se aplicou a vazão máxima, a taxa de percolação permaneceu baixa, enquanto a taxa de escoamento foi muito alta, chegando a 53,04%; conclui-se, então, que a baixa taxa de percolação, tanto para a vazão ótima como para a vazão máxima e a alta taxa de escoamento para a vazão máxima, podem ser explicadas pela baixa taxa de infiltração d'água neste solo (k igual a $0,00896$ e f_o igual a $0,00022$) e, ainda, pela declividade acentuada nesta área ($0,0173 \text{ m m}^{-1}$). Para a vazão de projeto ($1,30 \text{ L s}^{-1}$) os valores prognosticados para a eficiência de aplicação, taxa de escoamento e taxa de percolação foram, respectivamente, de 44,65, 34,12 e 21,23%, identificando que a escolha da vazão praticada pelo irrigante foi absolutamente inadequada.

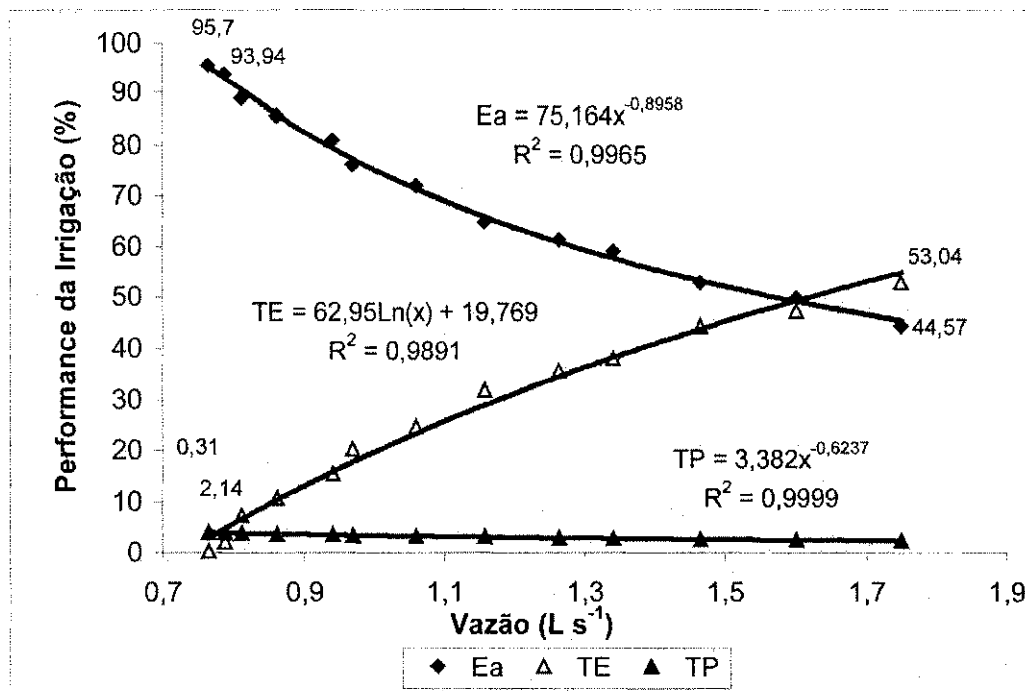


Figura 4.11. Performance da irrigação função da vazão de entrada (GUFCQ), vazão ótima $0,7879 \text{ L s}^{-1}$, Ea - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação

Para o exemplo DEMO1 observa-se na Figura 4.12 e na Tabela 4.5, que a vazão ótima ($0,84 \text{ L s}^{-1}$) está próxima da vazão mínima. O valor prognosticado pelo modelo para a vazão máxima foi de $1,77 \text{ L s}^{-1}$; para essas vazões, as perdas por escoamento foram, respectivamente, 2,8 e 36,74%, enquanto as por percolação foram 13,45 e 8,23%. A eficiência de aplicação prognosticada pelo modelo para a vazão ótima foi de 83,75% e, para a vazão máxima, 55,02%. Na Tabela 4.5 observa-se, neste exemplo, que para a vazão ótima as taxas de escoamento e percolação são pequenas, com diferença percentual entre elas de apenas 10,65%, enquanto isto não ocorreu para a vazão máxima, que apresentou diferença de 28,51%. Quando essas perdas são pequenas, obtêm-se altas eficiências de aplicação. No mesmo exemplo se nota que, a taxa de escoamento é muito mais afetada pela vazão que a taxa de percolação; os valores da taxa de percolação prognosticados para a vazão ótima e a para a vazão máxima, apresentaram pequena diferença (5,22%), o que pode ser explicado pelo tipo de solo quanto à textura desta área (silte arenoso), que apresenta baixa taxa de infiltração ou sob condições de insaturação (valor para o coeficiente k da equação de Kostiakov-Lewis igual a 0,0028) como de saturação (f_o igual 0,00022) (Tabela 3.1), resultando numa potencial bem maior para perdas por escoamento, comprometendo o desempenho do sistema de irrigação, principalmente com o uso de

vazões elevadas. Referente à vazão praticada em campo pelo irrigante, os valores prognosticados para a eficiência de aplicação, taxa de escoamento e taxa de percolação foram, respectivamente, 51,69, 34,67 e 13,64%, indicando portanto, valores próximos aos prognosticados para a vazão máxima, caso em que se observa que o produtor escolheu, na época, uma vazão próxima à máxima, porém não aplicou a estratégia de fluxo reduzido no sentido de minimizar as perdas por escoamento, justificando o baixo desempenho do sistema para esta vazão.

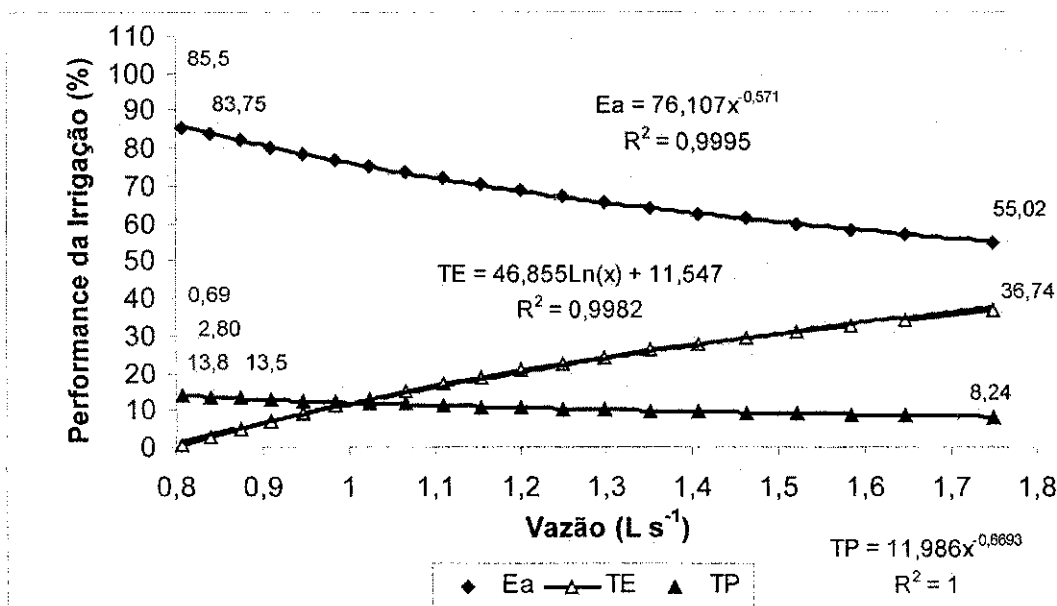


Figura 4.12. Performance da irrigação função da vazão de entrada (DEMO1), vazão ótima 0,84 L s⁻¹, Ea - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação

Para PISG2 (Figura 4.13 e Tabela 4.5) as curvas que representam a eficiência de aplicação d'água no sulco e a taxa de percolação se assemelham bastante, a ponto de, praticamente, se sobreporem, apresentando valores muito próximos para uma mesma vazão de entrada. A vazão ótima e a máxima prognosticadas pelo modelo foram, respectivamente, 1,66 e 5,92 L s⁻¹, favorecendo perdas por escoamento, de 0,46 e 70,33%, e perdas por percolação de 48,96 e 15,70%, que resultaram numa eficiência de aplicação de 50,57 e 13,97%. Observa-se, portanto, neste exemplo, grande diferença entre os valores das perdas por escoamento e por percolação, uma vez que a diferença entre elas foi de 48,5%, para a vazão ótima, e de 54,63, para a vazão máxima, resultando numa eficiência de aplicação baixa. A impossibilidade de obter valores mínimos para essas perdas nessas

condições de campo, fato este explicado em virtude da alta de infiltração d'água no solo (k igual a 0,02931 e f_o igual a 0,000152); neste caso, a vazão se mostrou, também, com efeito maior nas perdas por escoamento e com diferença de 69,88% entre os valores prognosticados para a vazão ótima e a máxima, que a infiltração nas perdas por percolação, para a qual a diferença foi de 33,26%. Para a vazão de projeto (1,47 L s⁻¹) os valores prognosticados para a eficiência de aplicação, taxa de escoamento e taxa de percolação foram, respectivamente, 47,62, 0 e 53,16% apresentando, portanto, valores próximos aos prognosticados para a vazão ótima, demonstrando que o irrigante fez uma escolha acertada da vazão, para as condições de campo em questão.

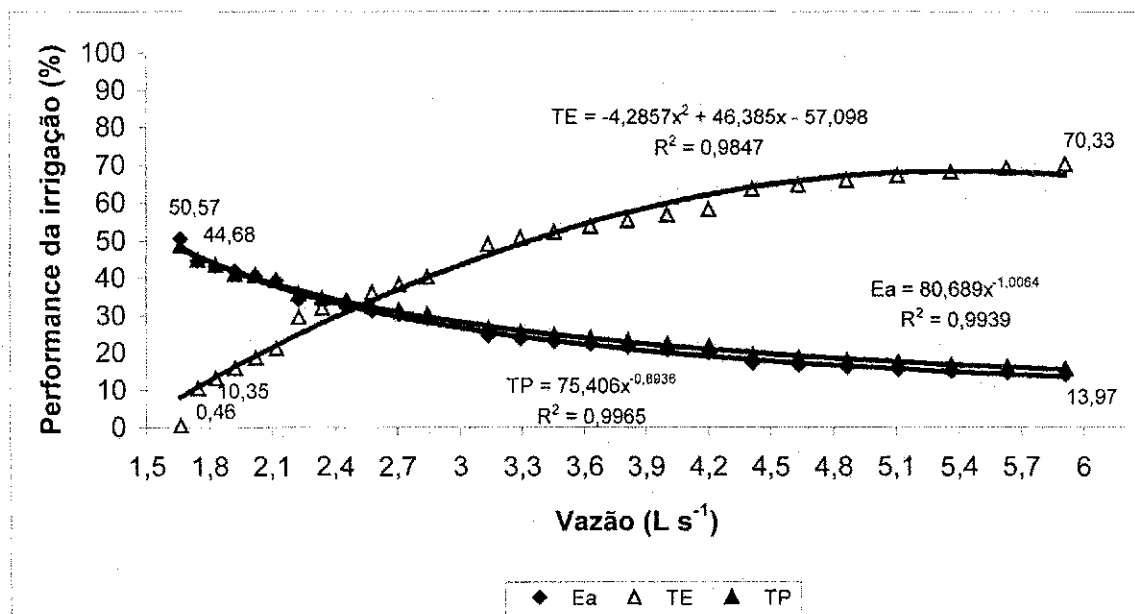


Figura 4.13. Performance da irrigação função da vazão de entrada (PISG2), vazão ótima 1,6631 L s⁻¹, Ea - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação

Para os dados de campo PISG3 (Figura 4.14 e Tabela 4.5) o valor prognosticado pelo modelo para a vazão ótima foi de 0,64 L s⁻¹, próximo da vazão mínima e, para a vazão máxima, 1,56 L s⁻¹, cujas perdas por escoamento foram, respectivamente, 0,78 e 60,45%, enquanto as por percolação foram 64,94 e 26,88%, resultando em eficiências de aplicação de 34,28 e 12,66%; verifica-se, então, que esta é também uma condição crítica de campo para o manejo do sistema de irrigação, cujas perdas por percolação e escoamento apresentam grande diferença, tanto para a vazão ótima como para

a vazão máxima. A diferença entre elas para a vazão ótima é de 64,16% e, para a vazão máxima, de 37,57%.

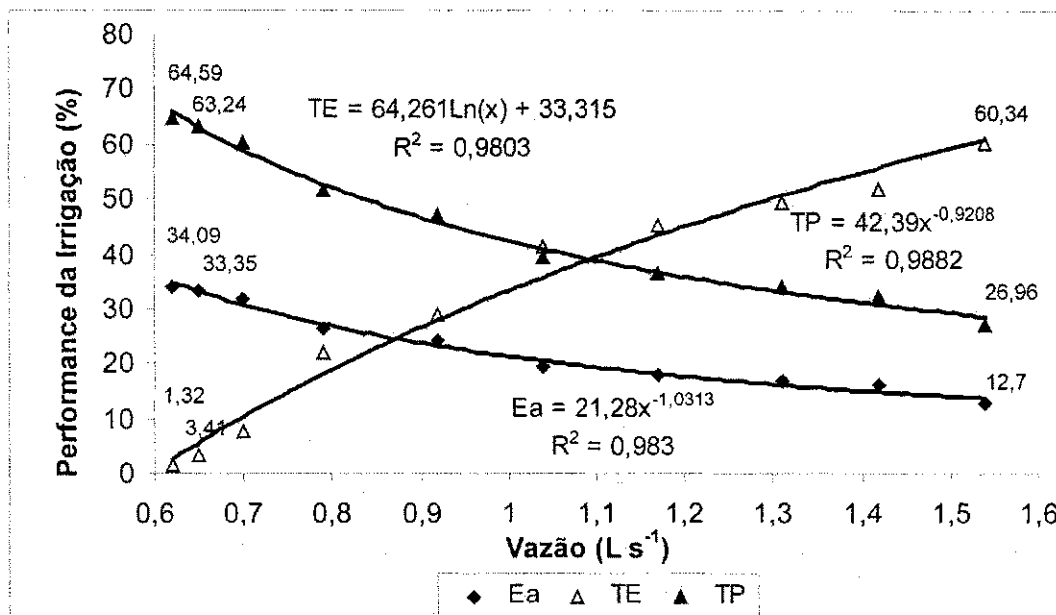


Figura 4.14. Performance da irrigação função da vazão de entrada (PISG3), vazão ótima 0,64 L s⁻¹, Ea - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação

Observa-se também, neste caso, que a vazão teve efeito maior nas perdas por escoamento que a alta taxa de infiltração (k igual a 0,01024 e f_0 igual a 0,000152, solo franco arenoso) nas perdas por percolação, de vez que a diferença entre as perdas por escoamento para a vazão ótima (próxima da mínima) e a máxima foi de 59,67%, enquanto a diferença entre as perdas por percolação foi de 38,06%. Constata-se, ainda neste exemplo, que a curva da taxa por percolação apresenta, basicamente, o mesmo comportamento da curva da eficiência de aplicação, isto é, inclinações semelhantes em determinadas faixas de vazão; entretanto, sempre com valores bastante distintos. Para a vazão de projeto (1,54 L s⁻¹) os valores prognosticados para a eficiência de aplicação, taxa de escoamento e taxa de percolação foram, respectivamente, 12,7, 60,3 e 27%, apresentando, portanto, valores prognosticados para as perdas bastante distintas, demonstrando que a vazão escolhida causará grandes perdas por escoamento, o que mostra assim, a necessidade de manejo da vazão para reduzir a diferença entre essas perdas.

No exemplo PSG4 (Figura 4.15 e Tabela 4.5), o valor prognosticado pelo modelo para a vazão ótima foi de $0,77 \text{ L s}^{-1}$, próximo, portanto, da vazão mínima, e para a vazão máxima $2,02 \text{ L s}^{-1}$, cujas perdas por escoamento foram, respectivamente, 2,95 e 58,53%, enquanto as por percolação foram 48,54 e 22,75%, resultando em eficiências de aplicação de 48,51 e 18,72%. Os resultados demonstram que esta é uma condição de campo crítica e de difícil manejo, visto que não se consegue minimizar as perdas por escoamento e percolação para vazões entre a mínima e a máxima permitidas, não sendo possível se obter altos níveis de desempenho do sistema. Para a vazão ótima a diferença entre as perdas foi de 45,59% e, para a vazão máxima, de 35,78%. Sem dúvida, a alta taxa de infiltração d'água (k igual a 0,0054 e f_0 igual a 0,000152) neste solo (franco argilo arenoso) contribuiu substancialmente para esta condição de difícil manejo; entretanto se demonstra, também, através desses resultados, que a vazão apresenta um potencial bem maior para afetar o desempenho do sistema de irrigação nas perdas por escoamento, que a taxa de infiltração nas por percolação, tendo em vista que para as mesmas condições de infiltração d'água no solo, para a vazão ótima a eficiência de aplicação foi de 48,51%, e para a vazão máxima, foi de 18,72%. Nota-se ainda, na Figura 4.15, que as curvas que representam a eficiência de aplicação e a taxa de percolação apresentam o mesmo comportamento, isto é, a mesma inclinação e com valores bem próximos, enquanto a curva que representa a taxa de escoamento demonstra inclinação alta e valores bem distintos para as taxas de escoamento prognosticado para as vazões ótima e máxima.

No que diz respeito à vazão de projeto ($1,13 \text{ L s}^{-1}$) os valores prognosticados para a eficiência de aplicação, taxa de escoamento e taxa de percolação foram, respectivamente, de 38,25, 30,40 e 31,35%, caso em que as perdas por escoamento e percolação apresentam valores próximos, mas ambas apresentam valores muito altos, o que faz com que a eficiência de aplicação seja baixa, inferior ao valor para a vazão ótima; desta forma e neste exemplo, o irrigante não foi feliz na escolha da vazão. O fato dos valores da eficiência de aplicação, taxa de escoamento e taxa de percolação terem sido bem próximos uns dos outros, se dá devido à vazão praticada pelo irrigante ter sido escolhida nas imediações dos pontos de intercessão dessas curvas.

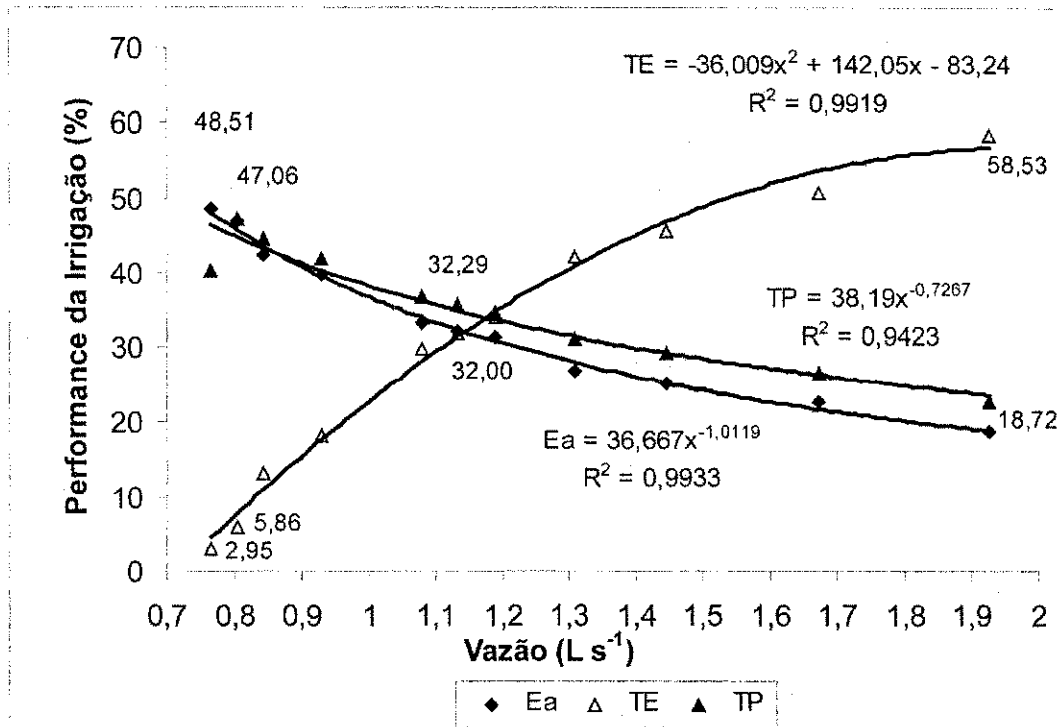


Figura 4.15. Performance da irrigação função da vazão de entrada (PISG4), vazão ótima 0,77 L s⁻¹, Ea - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação

Os resultados desta pesquisa mostram a necessidade da otimização no sistema de irrigação por sulco com fluxo contínuo, identificando também que em algumas condições de campo se pode alcançar altos níveis de desempenho. De acordo com os exemplos estudados, verifica-se que os melhores desempenhos da irrigação por sulco com fluxo contínuo são conseguidos para vazões próximas da vazão mínima permitida. Quando as perdas por escoamento e por percolação são mínimas, com pequena diferença entre elas, isto é, não havendo predominância de uma sobre a outra (perdas totais máximas em torno de 20%), chega-se aos melhores índices de eficiência de aplicação d'água. Em algumas condições de campo não se consegue controlar essas perdas, ou seja, otimizar a eficiência de aplicação, caso em que se deverá escolher a vazão que resulte no melhor desempenho do sistema de irrigação.

As análises dos resultados mostram que altas eficiências de aplicação d'água foram obtidas para os seguintes dados de campo: PISG1, com comprimento de 67 m, declividade de 0,0030 m m⁻¹ e solo franco-argilo arenoso, com baixas taxas de infiltração (*k* igual a 0,03781 e *f_o* igual a 0,000152, coeficientes da Equação de Kostiakov-Lewis); KWF, com comprimento de 360 m, declividade 0,0104 m m⁻¹ e solo franco-silte argiloso,

com baixas taxas de infiltração (k igual a 0,0088 e f_o igual a 0,00017); GUFCCQ, com comprimento de 217 m, declividade 0,0173 m m⁻¹ e solo silte-arenoso, com baixas taxas de infiltração (k igual a 0,00896 e f_o igual a 0,00022); e DEMO1, comprimento de 250 m, declividade 0,0080 m m⁻¹, e solo silte-arenoso, com baixas taxas de infiltração (k igual a 0,0028 e f_o igual a 0,00022). Enquanto os menores desempenhos foram alcançados para os dados de campo: PISG2, com comprimento de 84 m, declividade 0,0016 m m⁻¹ e solo franco-argilo arenoso, com alta infiltração (k igual a 0,02931 e f_o igual a 0,000152); PISG3, comprimento de 70 m, declividade 0,0016 m m⁻¹ e solo franco arenoso, com alta infiltração (k igual a 0,01024 e f_o igual a 0,000152); e PISG4, com comprimento de 115 m, declividade 0,0024 m m⁻¹ e solo franco-argilo arenoso, com alta infiltração (k igual a 0,412 e f_o igual a 0,000152).

Nas condições de campo em que se conseguiu controlar as perdas por escoamento e por percolação, os solos apresentam taxas de infiltração baixas; para referidas condições de infiltração, foi possível se obter um maior controle dessas perdas para uma faixa de comprimento de sulco de 67 a 360 m e de declividade de 0,030 a 0,0173 m m⁻¹, mostrando que a otimização do desempenho do sistema de irrigação por sulco pode ser obtida numa grande faixa de comprimento e declividade. Nas condições de campo nas quais não se conseguiu este controle, os solos possuem taxas de infiltração elevadas e as faixas de comprimento e de declividade foram, respectivamente, de 70 a 115 m e 0,0016 a 0,0043 m m⁻¹ mostrando, mais uma vez, que o comprimento e a declividade não interferem de forma decisiva na otimização.

Consta-se, então, que em solos com elevadas taxas de infiltração, a maior dificuldade na otimização é minimizar as perdas por percolação, fato este que contribui decisivamente para o não controle dessas perdas, uma vez que se pode, para essas condições de campo, minimizar facilmente as perdas por escoamento testando-se, na otimização, diferentes vazões; já nos solos com baixas taxas de infiltração, tanto as perdas por percolação como por escoamento podem ser facilmente minimizadas. Verifica-se, na irrigação por sulco com fluxo contínuo que, para qualquer condição de campo, a vazão afeta muito mais as perdas por escoamento que as por percolação podendo causar, quando se aproximar de valores máximos permitidos, grandes perdas por escoamento, significando que o que se diminuiu ou se aumenta em termos de perdas por escoamento é bem maior que o que se diminuiu ou se aumenta em termos de perdas por percolação, quando varia a

vazão; em outras palavras, para uma mesma faixa de variação da vazão, ocorrem maiores variações nas perdas por escoamento que por percolação. Isto acontece porque a taxa do fluxo d'água no interior do solo (taxa de infiltração) depende apenas da textura e estrutura do solo, não sofrendo, então, nenhuma influência da vazão aplicada, enquanto a taxa de fluxo na superfície do solo está diretamente relacionada à vazão aplicada. Por outro lado, as perdas por percolação são afetadas tanto pelo tempo de aplicação d'água como pela vazão, porque, por exemplo, quanto maior o tempo de aplicação d'água maior será a lâmina infiltrada, podendo resultar em condições de irrigação excessiva, e quanto menor for a vazão maiores serão as variações no tempo de avanço que resultarão em maiores variações no tempo de oportunidade de infiltração, favorecendo, conseqüentemente, a maiores lâminas infiltradas, principalmente quando deseja-se a condição de irrigação adequada; entretanto, o efeito da vazão na taxa de escoamento superficial é bem maior que nas variações do tempo de avanço da água ao longo da área. Outro aspecto é que a seção transversal de fluxo na superfície do solo é bastante superior à seção transversal de fluxo no seu interior, além de que a taxa de infiltração não depende da lâmina d'água na superfície do solo, que é estabelecida por uma determinada vazão e seção transversal de fluxo; enquanto que a taxa de escoamento superficial depende sobremaneira dessa lâmina, de maneira que para uma determinada seção transversal de fluxo quanto maior a vazão maior será a taxa de escoamento superficial. Deve-se enfatizar que o efeito da seção transversal do fluxo superficial na lâmina infiltrada é bem menor que na taxa de escoamento superficial.

Desta forma, conclui-se que as perdas por escoamento são as que mais afetam o desempenho dos sistemas de irrigação por sulco com fluxo contínuo, basta se atentar para o fato de que os baixos níveis de desempenho dos sistemas de irrigação utilizados nesta pesquisa, como exemplos, ocorreram devido à utilização de vazões (praticada pelo irrigante) próximas a valores máximos permitidos; acredita-se que este fato aconteça na maioria das áreas irrigadas onde se pratica a irrigação por sulco com fluxo contínuo, justificando os baixos níveis de desempenho registrados na literatura.

De acordo com Eldeiry et al. (2004) alta eficiência em sulcos, de 25 a 50 m, pode ser alcançada com descarga pequena. Pequenos erros na aplicação d'água podem reduzir a eficiência de aplicação para pequenos sulcos. Em sulcos com 100 m, uma eficiência de 80% é alcançada com descarga variando de 0,05 a 0,10 m³ min⁻¹; segundo os

autores, em sulco mínimo a eficiência é alta para pequenas vazões com pequenas variações; em sulcos longos porém, se obtém maior eficiência com menor dependência nas taxas de aplicação sendo, sem dúvida, o mais praticado. Azevedo et al. (2001), estudando o comportamento da vazão ótima na irrigação por sulco com fluxo contínuo notaram em sulco bloqueado no final da área, que na maioria das condições de campo estudadas a vazão ótima, isto é, aquela que resulta numa eficiência de aplicação d'água máxima, não é, necessariamente, a vazão máxima não erosiva mas sim, uma vazão inferior a esta; contrariando a filosofia da estratégia de fluxo reduzido em se adotar uma vazão próxima à máxima não erosiva, durante a fase de avanço.

O efeito do tempo de oportunidade de infiltração e do comprimento do sulco no tempo de aplicação d'água para diferentes tipos de solo, foi pesquisado por Azevedo et al. (2003), constaram maiores taxas de escoamento nos sulcos mais curtos e que, em todos exemplos analisados, essas taxas foram superior às taxas de percolação. Silveira et al. (2000) analisando o efeito da lâmina requerida no desempenho da irrigação por sulcos para diferentes tipos de solo e comprimento, variando de 100 a 250 m, constataram também que em sulcos curtos as perdas de escoamento comprometem muito mais o desempenho dos sistemas de irrigação por sulco que as perdas por percolação. Quanto à taxa de percolação, têm-se valores mais altos para pequenas vazões e para solos mais arenosos, apresentando decrescimento da taxa de percolação; com o aumento da vazão de entrada, tendendo-se a estabilizar-se quando se aproxima da vazão máxima. A taxa de percolação apresenta comportamento diferente, primeiro possui crescimento com o aumento da vazão e em seguida decresce, fato este explicado pelo avanço mais rápido para vazões maiores. Segundo Lima Filho (1996), o desempenho da irrigação por sulco é influenciado, dentre outros fatores, pela vazão de entrada, tempo de corte d'água, comprimento do sulco e por sua declividade. De acordo com Silveira et al. (2000) em sulcos longos não se deve usar pequenas vazões e em sulcos curtos, grandes vazões. Azevedo et al. (2003) concluíram que nos solos franco-arenosos se deve aumentar a vazão de aplicação d'água, para reduzir as perdas por percolação.

O efeito do tempo de oportunidade de infiltração e do comprimento do sulco no tempo de aplicação d'água para diferentes tipos de solos, foi pesquisado por Azevedo et al. (2003), os estudos mostraram que para os solos de textura fina, possui maior quantidade de microporos, a infiltração torna-se dificultada, e que o escoamento apresenta o potencial

maior do que a percolação. Enquanto que o solo de textura mais grossa possui maior quantidade de macroporos, com infiltração mais rápida, e as perdas por percolação dominante diante as perdas por escoamento.

Azevedo et al. (2003), avaliaram o efeito do tempo de aplicação da lâmina requerida no desempenho do sistema de irrigação por sulco para diferentes lâminas requeridas, em diferentes tipos de solo, constataram que nos solos argilosos, a eficiência de aplicação é mais comprometida para tempo de aplicação maior, enquanto, nos solos de textura grossa a eficiência de aplicação é mais afetada quando se aplica pequena lâmina num tempo de aplicação grande e uma lâmina grande num tempo de aplicação pequeno.

Carvalho et al. (1998c) constaram grandes variações espaciais e temporais no desempenho do sistema de irrigação por sulco, segundo esses autores essas variações foram consequência de variações nos parâmetros de campo e operacionais, e também das necessidades hídricas da cultura, ao longo de sua estação de cultivo. As perdas por escoamento apresentam um potencial de contribuição a essas variações, bem maiores que as perdas por percolação.

Os sistemas de irrigação superficial mostram o potencial de se aplicar água aos cultivos, com eficiências de 70% a 85% (Merriam & Keller, 1978); na verdade, alguns sistemas automatizados têm favorecido eficiência em torno de 90% (Fischback & Somerhalder, 1971); no entanto, a maioria dos projetos de irrigação no mundo tem trabalhado com eficiências de aplicação em torno de 40% a 50% ou com valores ainda menores (Bos & Nugteren, 1974; Clyma et al., 1975; Kruse & Heermann, 1977), apud Azevedo et al. (1992).

Com o exposto, constata-se a importância do modelo SASIS no prognóstico do desempenho da irrigação por sulco com fluxo contínuo, selecionando vazão de adução d'água em sulco aberto no final da área, que permita melhor eficiência de aplicação da água evitando, portanto, desperdício de água na irrigação. Segundo Silveira et al. (2000) durante o prognóstico do desempenho da irrigação por sulco o ideal será selecionar uma vazão que balanceie as perdas por escoamento e por percolação, o que, segundo eles, possibilita melhor performance da irrigação por sulco com fluxo contínuo, melhorando o manejo da água de irrigação.

4.8. Análise de sensibilidade

4.8.1. Fatores de ponderação espacial e temporal

Determinadas variáveis introduzidas no modelo SASIS influenciam nos resultados da simulação da irrigação por sulco com fluxo contínuo, sendo que algumas afetam de forma isolada a simulação, enquanto outras o efeito é conjugado, isto é, o efeito de uma depende do efeito de outras; posteriormente será mostrado que se tenha talvez um efeito conjugado entre os fatores de ponderação espacial (ϕ) e temporal (θ). Uma escolha adequada dos fatores de ponderação da integração das células deformáveis de avanço (Figuras 3.2 e 3.3) contribui para uma melhor simulação da curva de avanço favorecendo prognostico mais precisos da performance da irrigação. Para avaliar o comportamento da simulação do software com relação aos fatores de ponderação espacial, (ϕ) e temporal (θ), trabalhou-se com os dados de campo utilizados por Azevedo (1992), AMALGACQ tendo-se fixado todos os outros parâmetros e se variado ambos fatores de ponderação espacial (ϕ) no intervalo de 0,51 a 0,71 e temporal (θ) no intervalo de 0,51 a 0,61. Na Tabela 4.6 observa-se, que para os conjuntos de valores de ϕ e θ de (0,53 e 0,57; 0,57 e 0,59; 0,59 e 0,59; 0,65 e 0,61; e 0,60 e 0,60) ocorreram variações no tempo de avanço que variou de 14 a 22% em relação ao tempo de avanço medido em campo, vê-se portanto, existir várias combinações de valores destes fatores capazes de simular a fase de avanço com variações toleráveis para o prognostico do tempo de avanço; verifica-se também existir faixas de combinações desses fatores que não permitem simulações da fase de avanço, isto certamente deveu-se a linearidade da curva de avanço para estes dados de campo (AMALGACQ); quanto as eficiência de aplicação e de armazenamento e, o volume infiltrado, observou-se serem afetados diretamente pelos fatores de ponderação espacial e temporal; verificou-se variações nas eficiências de aplicação e armazenamento de 10,4 e 12,7% e volume no infiltrado 5,89 m³; o menor valor (58,5%) prognosticado para a eficiência de aplicação foi para combinação dos fatores de parâmetro de ponderação espacial e temporal de 0,51 e 0,57, respectivamente, enquanto o maior valor (58,9) foi para combinação 0,69 e 0,51; para a eficiência de armazenamento o menor (87,1%) valor prognosticado foi para as combinações (0,51 e 0,57), enquanto o valor máximo (100%) foi obtido para vários pares de combinações; quanto ao volume infiltrado o maior valor (39,12 m³) foi prognosticado quando se utilizou a combinação 0,69 e 0,51, para a

ponderação espacial (ϕ) e temporal (θ), respectivamente, enquanto o menor valor prognosticado para o volume infiltrado ($33,3 \text{ m}^3$) foi quando se utilizou 0,51 para a ponderação espacial (ϕ) e 0,57 para a ponderação temporal (θ). Observou-se portanto, de certa forma, quanto mais criteriosa for a escolha dos fatores ϕ e θ , melhor será o resultado da simulação. O SIRMOD simulou, para estes dados de campo (AMALGACQ), tempo de avanço 67,3 min e, prognosticou uma eficiência de aplicação d'água e de armazenamento de 67,2 e 100%, respectivamente, e também prognosticou um volume infiltrado de $41,43 \text{ m}^3$, para o valor de ϕ de 0,51 e θ de 0,60. Observa-se, portanto, na Tabela 4.6, que existem várias combinações de fatores de ponderação da equação de Saint-Venant, capaz de melhorar a simulação da fase de avanço com o modelo SASIS. Walker (2001) usa, no SIRMOD III, 0,60 para ambos e segundo ele, outros modelos usam valores de 0,51 a 0,55. O software SASIS recomenda valores próximos de 0,60 para ambos. Conforme Carvalho (1994) os fatores de ponderação espacial e temporal, ϕ e θ , são usados na integração por causa da não linearidade da equação da continuidade. Pelos valores apresentados na Tabela 4.6 verifica-se que, com o crescimento do fator de ponderação, ocorre uma pequena variação nas eficiências de aplicação, armazenamento e no volume infiltrado; com o tempo de avanço se dá o contrário, ou seja, decresce sempre que o fator de ponderação cresce.

Tabela 4.6. Análise de sensibilidade da simulação, pelo modelo SASIS, com relação à variação dos fatores de ponderações espacial (ϕ) e temporal (θ), para os dados de campo AMALGACQ (Tempo de avanço = 232 min)

$\phi \backslash \theta$	0,51				0,53				0,55				0,57				0,59				0,61			
	TL	Ea	Er	Vz	TL	Ea	Er	Vz	TL	Ea	Er	Vz	TL	Ea	Er	Vz	TL	Ea	Er	Vz	TL	Ea	Er	Vz
0,51	115	63,7	94,9	36,21	130	62,7	93,4	35,61	160	62,7	93,3	35,54	290	58,5	87,1	33,23								
0,53	110	63,4	94,3	36,04	125	63,8	95,0	36,20	145	62,2	92,6	35,28	195	60,4	89,0	34,28								
0,55	110	66,4	98,9	37,70	120	64,3	95,7	36,50	140	64,4	95,9	36,5	170	61,4	91,4	34,80								
0,57	105	65,2	97,0	37,06	115	64,2	95,6	36,49	130	63,5	94,5	36,0	155	62,1	92,4	35,19	265	58,9	87,7	33,42				
0,59	105	67,9	100	38,54	110	63,3	94,7	36,17	125	64,3	95,7	36,46	145	62,9	93,4	35,64	190	60,4	90,0	34,27				
0,60	100	64,6	96,2	36,78	110	65,0	96,8	36,94	120	62,9	93,7	35,74	140	62,8	93,5	35,62	180	61,5	91,6	34,87				
0,61	100	65,8	98,0	37,43	110	66,4	98,9	37,70	120	64,5	96,0	36,60	135	62,5	93,0	35,44	170	61,9	92,1	35,08				
0,63	100	68,1	100	38,70	105	64,9	96,7	36,91	115	64,2	95,5	36,44	130	63,5	94,6	36,03	155	62,2	92,7	35,29				
0,65	95	65,2	97,0	37,13	105	67,4	100	38,24	115	67,0	99,8	38,00	125	64,0	95,3	36,30	145	62,7	93,3	35,55	190	60,2	89,6	34,13
0,67	95	67,5	99,8	38,16	100	65,0	96,8	36,99	110	65,7	97,9	37,24	120	63,9	95,2	36,28	140	64,2	95,6	36,37	170	61,5	91,6	34,88
0,69	95	68,9	100	39,12	100	67,0	99,7	38,07	105	64,0	95,3	36,39	115	63,3	94,3	35,99	130	62,5	93,0	35,46	155	61,6	91,6	34,91
0,71	90	64,7	96,3	36,93	100	68,9	100	39,10	105	66,1	98,4	37,53	115	65,7	97,8	37,26	125	62,9	93,7	35,72	150	63,3	94,3	35,88

TL - tempo de avanço no final da área, min; Ea - eficiência de aplicação, %; Er - eficiência de armazenamento, %; Vz - volume infiltrado, m³

Observa-se, na Figura 4.16, que para valores de ϕ compreendidos entre 0,51 a 0,71 e valores de θ compreendidos entre 0,51 a 0,61, a simulação do tempo de avanço da água no sistema de irrigação por sulco com fluxo contínuo é diretamente afetada com a variação desses fatores de ponderação espacial e temporal da equação Saint-Venant. Analisando-se o efeito do fator de ponderação espacial ϕ e temporal θ , na simulação do tempo de avanço, observa-se, na Figura 4.16, comportamento variado para a simulação deste valor, de vez que o tempo de avanço é afetado com a mudança dos valores de ϕ e de θ ; na Tabela 4.6, indica que o menor valor simulado para o tempo de avanço (90 min) foi, para ϕ , igual a 0,71 e θ igual a 0,51, enquanto o maior valor simulado para o tempo de avanço (290 min) foi, para ϕ , igual a 0,51 e θ igual a 0,57 ocorrendo, portanto, uma variação de 222% no tempo de avanço simulado pelo modelo, no entanto, vê-se na Tabela 4.6 que as situações que melhores se aproximou do valor medido em campo foi para ϕ e θ , iguais a 0,57 e 0,59, respectivamente; e ϕ e θ iguais a 0,60 e 0,61, respectivamente; observa-se que a simulação é mais afetada quando se consideram valores de θ inferior a 0,55 e valores de ϕ superior a 0,60; observa-se na figura que o tempo de avanço é mais afetado para valores de ϕ superior a 0,55 e ϕ inferior a 0,55, sendo que a simulação é mais afetada pelo fator de ponderação espacial do que pelo fator de ponderação temporal. Afirmando, portanto, os valores utilizados para ϕ e θ (0,60 e 0,60), por Walker (2001) no SIRMOD III e, aqui, pelo software SASIS.

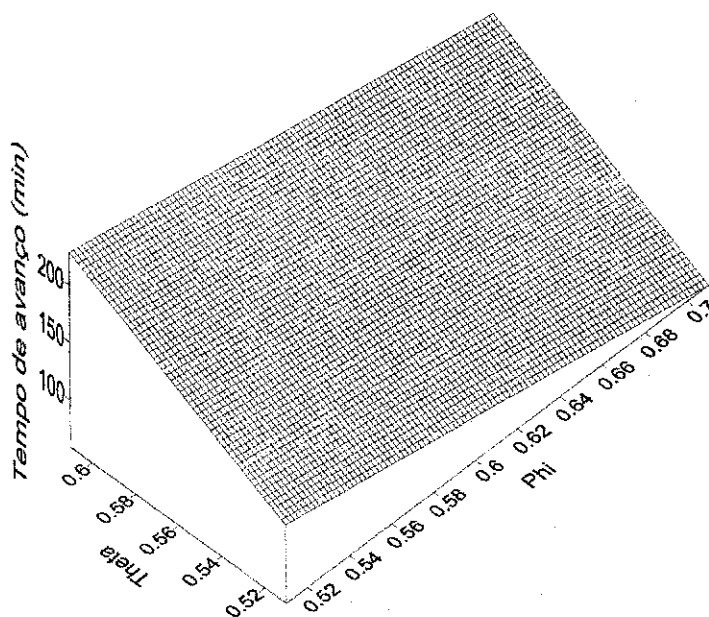


Figura 4.16. Sensibilidade da simulação do tempo de avanço no final da área da irrigação por sulco com fluxo contínuo aos fatores de ponderação espacial ϕ e temporal θ , para os dados de campo AMALGACQ

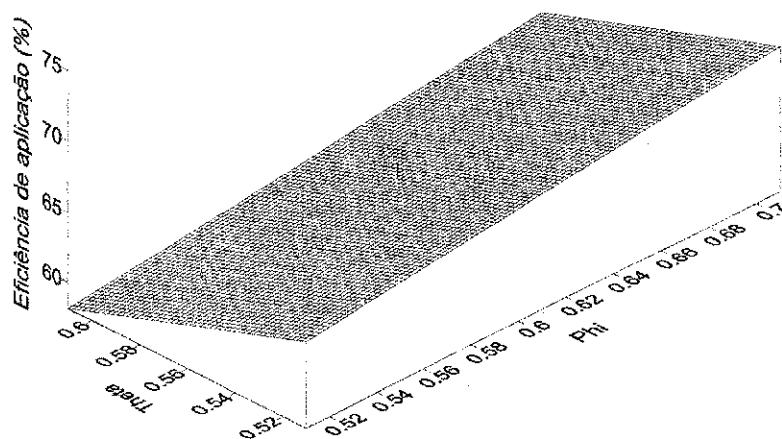


Figura 4.17. Sensibilidade do prognóstico da eficiência de aplicação d'água na irrigação por sulco com fluxo contínuo aos fatores de ponderação espacial ϕ e temporal θ , para os dados de campo AMALGACQ

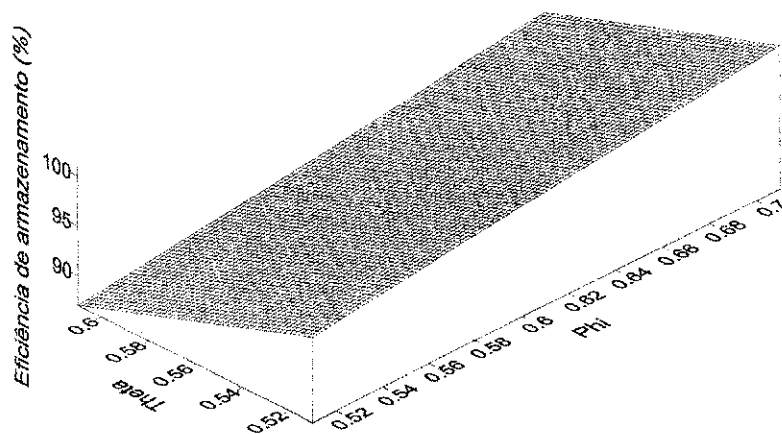


Figura 4.18. Sensibilidade do prognóstico da eficiência de armazenamento d'água na irrigação por sulco com fluxo contínuo aos fatores de ponderação espacial ϕ e temporal θ , para os dados de campo AMALGACQ

Analisando-se o efeito do fator de ponderação espacial ϕ e temporal θ , no volume infiltrado, observa-se, na Figura 4.19, comportamento variado para a simulação deste valor, de vez que o volume oscila com o crescimento de ϕ e de θ . Esta oscilação confirma a variação que ocorre na eficiência de aplicação da água com o crescimento dos

valores de ϕ e de θ . A Tabela 4.6, indica que o menor valor simulado para o volume infiltrado ($33,23 \text{ m}^3$) foi, para ϕ , igual a 0,51 e θ igual a 0,57, enquanto o maior valor ($39,12 \text{ m}^3$) foi, para ϕ , igual a 0,69 e θ igual a 0,51 ocorrendo, portanto, uma variação de 17,7% no volume infiltrado. Observa-se na figura que os menores valores prognosticados para o volume infiltrados são quando se consideram valores de θ próximo de 0,60 e valores de ϕ próximo de 0,51; enquanto os maiores valores prognosticados para o volume infiltrados são quando se consideram valores de ϕ superior a 0,60, podendo θ assumir valores entre 0,51 a 0,61.

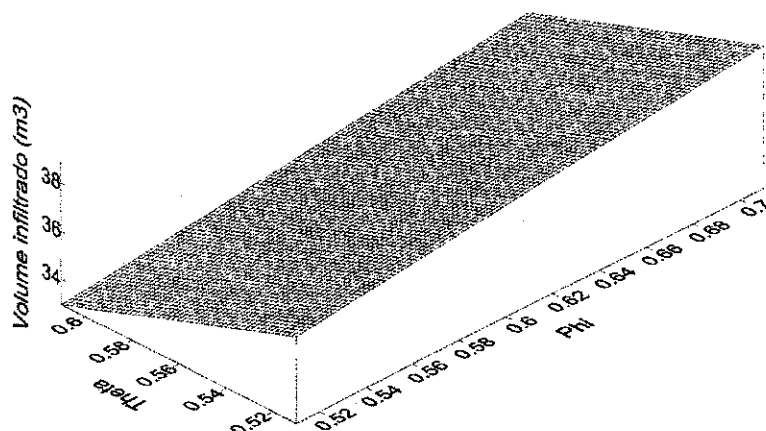


Figura 4.19. Sensibilidade do prognóstico do volume d'água infiltrado na irrigação por sulco com fluxo contínuo aos fatores de ponderação espacial ϕ e temporal θ , para os dados de campo AMALGACQ

4.8.2. Incremento de tempo da simulação

O comportamento da simulação do software desenvolvido nesta pesquisa com relação ao incremento do tempo de simulação, foi analisado utilizando-se dados de campo utilizado por Azevedo (1992), (AMALGACQ, propriedade privada); fixaram-se todos parâmetro e se variou o incremento do tempo de simulação de 5 a 30 min. Várias simulações foram realizadas e o resultado apresentado na Tabela 4.7, na qual se verifica que o crescimento do incremento de simulação afeta a simulação da irrigação e que, quando se trabalha com incremento de tempo menor, a precisão do programa é maior, se aproximando mais dos valores medidos em campo; para o exemplo pesquisado o avanço prognosticado com o incremento de 5 min superestimou o avanço medido no final da área em 33 min, o que correspondeu a uma diferença de 14,2%, enquanto para o incremento de

tempo de 30 min o modelo subestimou o avanço medido em 52 min, o que correspondeu a uma diferença de 22,4%, verificou-se também que a pior situação foi para o incremento de tempo de 20 min, onde o avanço prognosticado subestimou o avanço medido em 72 min (31%). Quanto ao prognóstico do desempenho da irrigação observou-se pequena diferença nos valores simulados para eficiência de aplicação (3,6%) e armazenamento (5,3%); quanto ao volume infiltrado vê-se que o menor volume prognosticado pelo modelo foi para o incremento de tempo de 5 min (33,4 m³) e o maior 37,1 m³ para o incremento de 30 min, apresentando, portanto, variação de 9,7% entre o valor máximo e mínimo. Nas Tabelas 4.3 e 4.4, apresentadas acima, para esses mesmo dados de campo o software SIRMOD simulou um volume infiltrado de 41,433 m³ e eficiência de aplicação e armazenamento de 67,2 e 100%, respectivamente, já o tempo de avanço prognosticado pelo SIRMOD para o final da área, neste exemplo foi de 67,3 min, enquanto o avanço medido em campo foi de 232 min; observa-se na Tabela 4.1, para um incremento de tempo de simulação igual a 5 min que o SIRMOD subestimou o avanço medido em 71%, enquanto o SASIS superestimou em 12,4%; de acordo com o exposto observa-se que para grandes incrementos de tempo o prognostico do avanço com o modelo SASIS sofre grandes variações, sendo portanto, recomendado para o prognostico do avanço o incremento de tempo de 5 min.

Tabela 4.7. Análise de sensibilidade da simulação, pelo modelo SASIS, com relação à variação do incremento de tempo de simulação, para os dados de campo AMALGACQ

Incremento de tempo (min)	Tempo de avanço (l) (min)	Eficiência de aplicação (%)	Eficiência de armazenamento (%)	Volume infiltrado (m ³)
5	265	58,8	87,6	33,40
10	170	59,7	88,8	34,4
15	165	59,0	87,8	34,7
20	160	56,5	84,2	34,0
25	175	60,1	89,5	36,5
30	180	59,9	89,2	37,1

(l) Valores simulados para o final da área para θ e ϕ iguais a 0,60, cujo valor medido em campo foi 232 min

Observa-se, na Figura 4.20, que as simulações da performance da irrigação por sulco, com fluxo contínuo, são pouco afetadas com a variação do incremento do tempo

de simulação; o mesmo pode ser constatado para o volume infiltrado, como se observa na Figura 4.21.

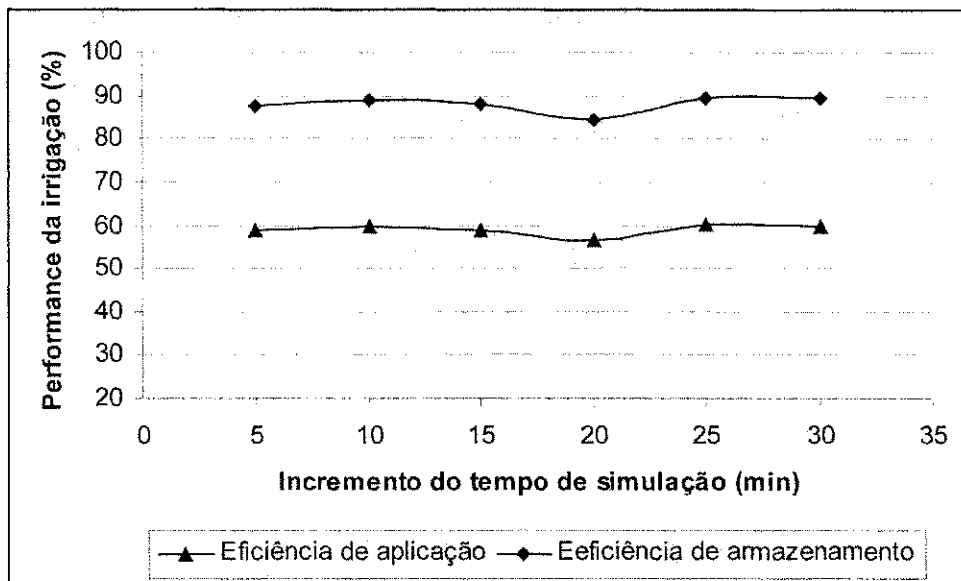


Figura 4.20. Sensibilidade do prognostico da performance da irrigação por sulco com fluxo contínuo, com relação ao incremento do tempo de simulação, para os dados de campo AMALGACQ

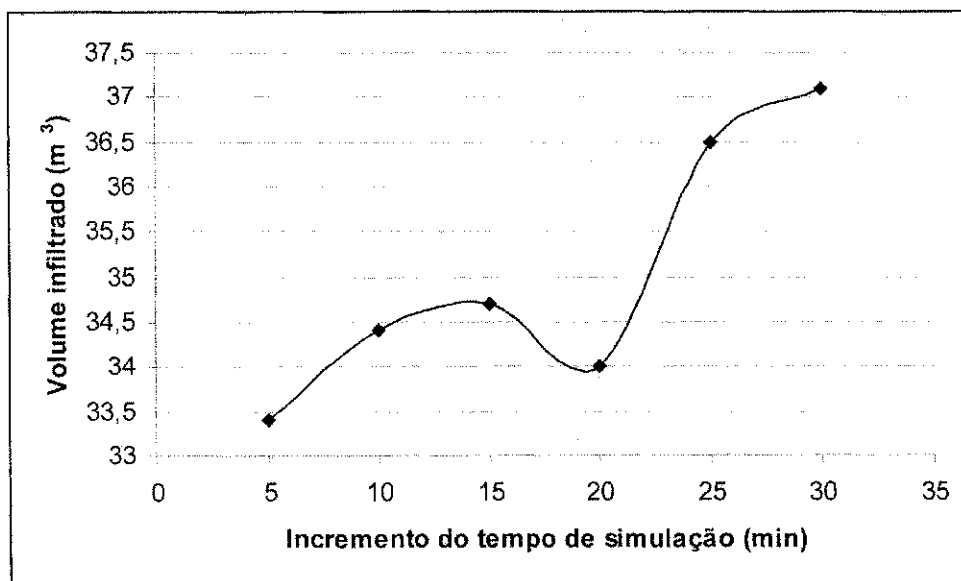


Figura 4.21. Sensibilidade do prognostico do volume d'água infiltrado na irrigação por sulco com fluxo contínuo, com relação ao incremento do tempo de simulação, para os dados de campo AMALGACQ

Com relação ao comportamento do tempo de avanço com o incremento do tempo de simulação verifica-se, na Figura 4.22, que para o intervalo de 5 a 10 min no incremento do tempo ocorreu grandes variações no prognóstico do tempo de avanço da água no sulco; para os valores de incremento de 10 a 30 min, o tempo de avanço simulado pelo modelo apresentou pequena variação no prognóstico. Na Figura 4.22 tem-se, entre os intervalos de incremento de tempo compreendido entre 10 a 30 min, que os gráficos assumem valor quase constante, apresentando valores semelhantes na performance da irrigação, a Tabela 4.7.

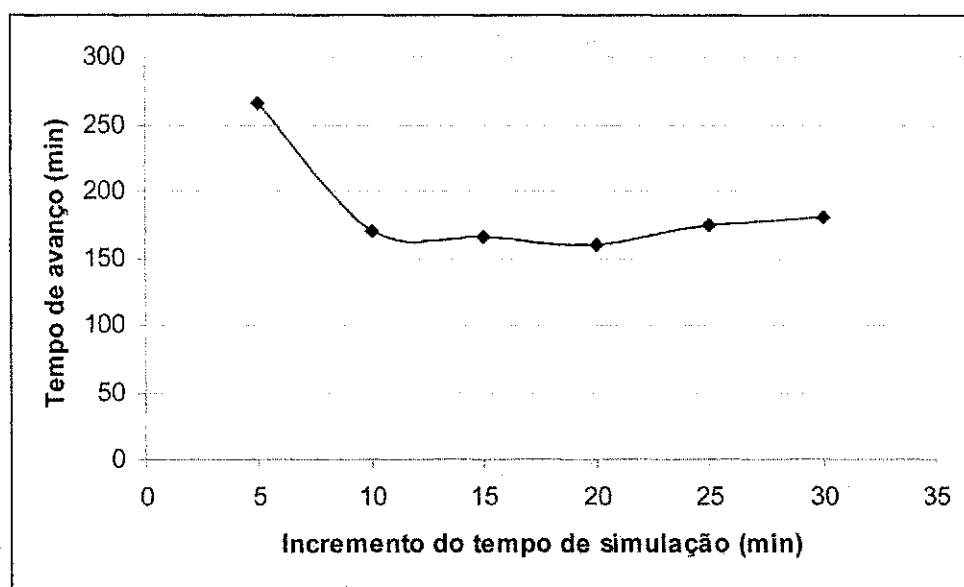


Figura 4.22. Sensibilidade da simulação do tempo de avanço no final da área na irrigação por sulco com fluxo contínuo, com relação ao incremento do tempo de simulação, para os dados de campo AMALGACQ

4.8.3. Rugosidade e declividade

Os resultados da análise de sensibilidade estão apresentados na Tabela 4.8 e Figura 4.23, processada através do software SUFER 7. Observa-se que ocorreram variações acentuadas na vazão máxima não erosiva ($Q_{m\acute{a}x}$) em relação a rugosidade (n) e a declividade (S_o); para S_o igual a $0,001 \text{ m m}^{-1}$ quando n variou de 0,01 para $0,0477 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ a $Q_{m\acute{a}x}$ aumentou de 1,26 para $30,48 \text{ L s}^{-1}$ (aumento de $29,22 \text{ L s}^{-1}$), enquanto para um valor de S_o de $0,021 \text{ m m}^{-1}$, nesta mesma faixa de variação da rugosidade, $Q_{m\acute{a}x}$ aumentou de 0,06 para $1,36 \text{ L s}^{-1}$ (aumento de apenas $1,30 \text{ L s}^{-1}$). Para a rugosidade de $0,01 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ quando a

declividade variou de 0,001 para 0,021 $m\ m^{-1}$ a vazão máxima não erosiva diminui de 1,26 para 0,06 $L\ s^{-1}$ (diminuição de 1,20 $L\ s^{-1}$), entretanto para a rugosidade de 0,0477 $m^{-1/3}$, nesta faixa de variação da declividade, a vazão máxima não erosiva diminui de 30,48 para 1,36 $L\ s^{-1}$ (diminuição de 29,12 $L\ s^{-1}$). Constata-se, então, que existe um efeito conjugado de n e S_o no valor de $Q_{m\acute{a}x}$, ou seja, o efeito de um parâmetro depende do efeito do outro. O maior valor para $Q_{m\acute{a}x}$ (30,48 $L\ s^{-1}$) ocorreu para a maior rugosidade e a menor declividade, acontecendo o inverso para o menor valor para $Q_{m\acute{a}x}$ (0,06 $L\ s^{-1}$). Verifica-se, então, que a rugosidade tem um efeito bem maior na vazão máxima não erosiva que a declividade e que para qualquer valor de S_o , quando n aumenta $Q_{m\acute{a}x}$ também aumenta, já para qualquer valor de n , $Q_{m\acute{a}x}$ diminui com o aumento na S_o . Isto se explica porque na equação da vazão máxima não erosiva proposta por Walker & Skogerboe (1987), S_o está como um divisor da velocidade máxima não erosiva da água ($V_{m\acute{a}x}$), enquanto n além ser um fator multiplicativo de $V_{m\acute{a}x}$, está elevado ao quadrado; por isto, $Q_{m\acute{a}x}$ aumenta quando n aumenta e diminui quando S_o aumenta. Para as faixas de declividade e rugosidade utilizadas nesta análise de sensibilidade, as quais exprimem condições reais de campo, detectou-se combinações entre esses parâmetros que geram vazões máximas não erosivas impraticáveis, por serem tanto muito pequenas como grandes demais. Em termos práticos $Q_{m\acute{a}x}$ deve ser superior à vazão mínima, isto é, aquela que garante que a água avance até ao final da área irrigada, e igual ou inferior a vazões normalmente disponibilizadas aos irrigantes pelos gestores da água no perímetro irrigado. Inclusive, em muitos casos a estratégia de fluxo reduzido torna-se impraticável devido à disponibilidade de certo volume de água por um determinado período insuficiente para possibilitar a utilização de uma vazão máxima não erosiva.

Os resultados desta pesquisa demonstram a necessidade de se ter uma especial atenção na estimativa da rugosidade da superfície do solo, a qual deve ser a mais precisa possível, uma vez que a mesma poderá até se tornar uma limitação de uso de uma vazão máxima não erosiva, devido a resultar em valores impraticáveis de $Q_{m\acute{a}x}$ fora da faixa aceitável na literatura que é de 1,2 a 4,0 $L\ s^{-1}$. Walker & Skogerboe (1987) recomendam para áreas lisas e previamente irrigadas, para terrenos recentemente preparados, e para condições de campo onde a densidade da cultura obstrui o movimento d'água, respectivamente, valores para n iguais a 0,02, 0,04 e 0,15. A Tabela 4.8 exibe em negrito as combinações entre S_o e n que resultam em $Q_{m\acute{a}x}$ admissíveis. Esta análise de sensibilidade foi também de grande valia para se estabelecer uma interface no software

SASIS capaz de orientar o usuário desta ferramenta no input de valores adequados para S_o e n ao processo de simulação da irrigação por sulco com fluxo contínuo e da otimização de seu desempenho.

Criddle (1950) apud Bernardo (1995), propôs a equação para calcular a vazão máxima não erosiva, cujos valores obtidos com esta equação são adequados para solos de textura média e com declividade próxima a 0,5%. Em solos argilosos pode-se aumentar a vazão e em solos arenosos haverá que diminuí-la. Através desta equação a vazão é superestimada para declividades menores que 0,5% e subestimada para declividades maiores que 0,5%. A equação de Walker & Skogerboe (1987), utilizada nesta pesquisa, leva vantagem sobre a equação de Criddle (1950), porque o grau de empirismo nela é menor, uma vez que além da declividade a mesma considera também a rugosidade e a capacidade de armazenamento d'água do sulco através dos parâmetros empíricos da geometria da seção transversal de fluxo. Para implementação da estratégia de fluxo reduzido, Daker (1988) apresenta uma tabela de vazão inicial máxima que um sulco pode receber, sem estar sujeito à erosão, em função de sua declividade; para a declividade mínima (0,5 por mil) a vazão máxima é de 4,0 L s⁻¹, enquanto que para a declividade máxima (5,0 por mil) é de 1,3 L s⁻¹. Segundo este autor a vazão reduzida vai depender da taxa de infiltração básica do solo, parâmetro que pode ser determinado por processos os mais diversos.

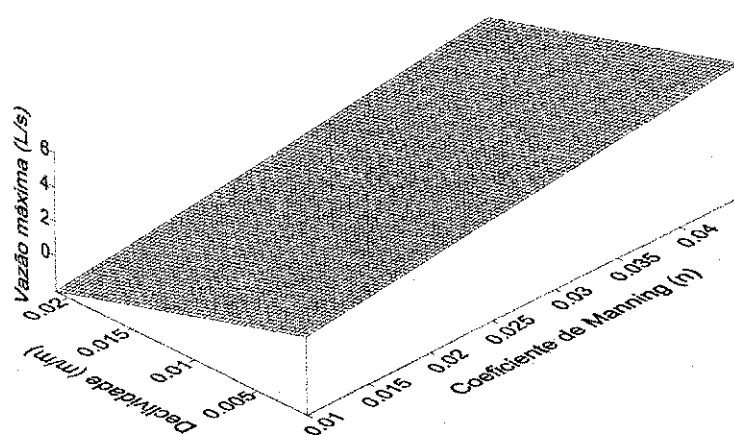


Figura 4.23. Sensibilidade do prognóstico da vazão máxima não erosiva na irrigação por sulco com fluxo contínuo aos parâmetros de campo rugosidade (n) e declividade (S_o), para os dados de campo AMALGACQ

Tabela 4.8. Análise de sensibilidade do prognóstico da vazão máxima não erosiva, pelo modelo SASIS, com relação à variação dos parâmetros de campo rugosidade (n) e declividade (S_o), para os dados de campo AMALGACQ ($\rho_1 = 0,73$ e $\rho_2 = 2,98$, velocidade máxima = 13 m min^{-1})

Rugosidade ($\text{m}^{-1/3} \text{ s}$)	Declividade (m m^{-1})										
	0,001	0,003	0,005	0,007	0,009	0,011	0,013	0,015	0,017	0,019	0,021
0,01	1,26	0,41	0,24	0,17	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06
0,0129	2,11	0,69	0,41	0,29	0,22	0,18	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09
0,0158	3,20	1,04	0,62	0,44	0,34	0,28	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14
0,0187	4,51	1,47	0,87	0,62	0,48	0,39	0,33	0,28	0,25	0,22	0,20
0,0216	6,05	1,97	1,17	0,83	0,64	0,52	0,44	0,38	0,34	0,30	0,27
0,0245	7,83	2,55	1,51	1,07	0,83	0,68	0,57	0,49	0,43	0,39	0,35
0,0274	9,83	3,21	1,90	1,35	1,04	0,85	0,72	0,62	0,55	0,49	0,44
0,0303	12,07	3,94	2,34	1,66	1,28	1,05	0,88	0,76	0,67	0,60	0,54
0,0332	14,55	4,74	2,82	2,00	1,55	1,26	1,06	0,92	0,81	0,72	0,65
0,0361	17,26	5,63	3,34	2,37	1,83	1,49	1,26	1,09	0,96	0,86	0,77
0,0390	20,21	6,59	3,91	2,77	2,15	1,75	1,48	1,27	1,12	1,00	0,90
0,0419	23,40	7,63	4,53	3,21	2,49	2,03	1,71	1,48	1,30	1,16	1,05
0,0448	26,82	8,74	5,19	3,68	2,85	2,32	1,96	1,69	1,49	1,33	1,20
0,0477	30,48	9,94	5,90	4,19	3,24	2,64	2,23	1,92	1,69	1,51	1,36

4.8.4. Parâmetros empíricos da geometria do sulco

Os resultados da análise de sensibilidade estão apresentados na Tabela 4.9 e Figura 4.24, processada através do software SUFER 7. Consta-se que aconteceram grandes variações na vazão máxima não erosiva ($Q_{m\acute{a}x}$) quando ocorreram variações nos parâmetros da geometria da seção transversal de fluxo (ρ_1 e ρ_2); para ρ_2 igual a 2,60 quando ρ_1 variou de 0,17 para 0,80 $Q_{m\acute{a}x}$ diminui de 2,39 para 0,18 L s⁻¹ (diminuição de 2,21 L s⁻¹), enquanto para um valor de ρ_2 igual a 3,00, nesta mesma faixa de variação de ρ_1 , $Q_{m\acute{a}x}$ diminui de 14,50 para 3,08 L s⁻¹ (diminuição de 11,42 L s⁻¹). Para ρ_1 igual a 0,17 quando ρ_2 variou de 2,60 para 3,00 a vazão máxima não erosiva aumentou de 2,39 para 14,50 L s⁻¹ (aumento de 12,11 L s⁻¹), entretanto para ρ_1 igual a 0,80, nesta faixa de variação de ρ_2 , a vazão máxima não erosiva aumentou de 0,18 para 3,08 L s⁻¹ (aumento de apenas 2,9 L s⁻¹). O maior valor para $Q_{m\acute{a}x}$ (14,50 L s⁻¹) ocorreu para o maior valor de ρ_2 e para o menor valor de ρ_1 , acontecendo o contrário para o menor valor para $Q_{m\acute{a}x}$ (0,18 L s⁻¹), ou seja, ocorrendo para o menor valor para ρ_2 e para o maior valor para ρ_1 . Observa-se, então, que ρ_2 tem um efeito bem maior na vazão máxima não erosiva que ρ_1 , e ainda que para qualquer valor de ρ_2 , quando ρ_1 aumenta $Q_{m\acute{a}x}$ diminui, já para qualquer valor de ρ_1 , $Q_{m\acute{a}x}$ aumenta com o aumento em ρ_2 . Este fato se explica porque na equação da vazão máxima não erosiva proposta por Walker & Skogerboe (1987), ρ_1 está como um divisor da velocidade máxima não erosiva da água ($V_{m\acute{a}x}$), enquanto ρ_2 é um fator exponencial tanto para $V_{m\acute{a}x}$ internamente como para todas as demais variáveis desta equação. Na verdade, ρ_1 e ρ_2 são os coeficientes, respectivamente, linear e exponencial, de funções potenciais que descrevem a relação entre a área da seção transversal de fluxo (ou perímetro molhado) e altura de fluxo; dessa forma o efeito multiplicativo de ρ_1 na área da seção transversal de fluxo é linear, enquanto de ρ_2 é exponencial, afetando, conseqüentemente, muito mais a vazão máxima não erosiva. Verifica-se que existe um efeito conjugado de ρ_1 e ρ_2 no valor de $Q_{m\acute{a}x}$, ou seja, o efeito de um parâmetro depende do efeito do outro. Para as faixas de ρ_1 e ρ_2 utilizadas nesta análise de sensibilidade, as quais correspondem a condições reais de campo, detectaram-se combinações entre esses parâmetros que resultam em vazões máximas não erosivas impraticáveis, no sentido de serem muito pequenas ou muito grandes.

Na prática, $Q_{m\acute{a}x}$ deve ser superior à vazão mínima, isto é, aquela que garante que a água avance até ao final da área irrigada, e igual ou inferior a vazões normalmente disponibilizadas aos irrigantes pelos gestores da água no perímetro irrigado. Em muitas situações a estratégia de fluxo reduzido torna-se impraticável devido à disponibilidade de certo volume de água por um determinado período ser insuficiente para possibilitar a utilização de uma vazão grande que corresponda a um valor máximo não erosivo. Os resultados desta pesquisa apontam para a importância de se ter uma estimativa dos parâmetros da geometria da seção transversal de fluxo (ρ_1 e ρ_2) a mais precisa possível, sabendo-se que a grandeza dessa seção poderá resultar em valores impraticáveis de $Q_{m\acute{a}x}$, fora da faixa aceitável na literatura que é de 1,2 a 4,0 L s⁻¹. A Tabela 4.9 exibe em negrito as combinações entre ρ_1 e ρ_2 que resultam em $Q_{m\acute{a}x}$ admissíveis. Esta análise de sensibilidade foi também de grande benefício para se criar uma interface no software SASIS capaz de orientar o usuário desta ferramenta no input de valores adequados para ρ_1 e ρ_2 ao processo de simulação da irrigação por sulco com fluxo contínuo e da otimização de seu desempenho.

Criddle (1950) apud Bernardo (1995), propôs a equação para calcular a vazão máxima não erosiva, cujos valores obtidos com esta equação são adequados para solos de textura média e com declividade próxima a 0,5%. Em solos argilosos pode-se aumentar a vazão e em solos arenosos haverá que diminuí-la. Através desta equação a vazão é superestimada para declividades menores que 0,5% e subestimada para declividades maiores que 0,5%. A equação de Walker & Skogerboe (1987), utilizada nesta pesquisa, leva vantagem sobre a equação de Criddle (1950), porque o grau de empirismo nela é menor, uma vez que além da declividade a mesma considera também a rugosidade e a capacidade de armazenamento d'água do sulco através dos parâmetros empíricos da geometria da seção transversal de fluxo. Para implementação da estratégia de fluxo reduzido, Daker (1988) apresenta uma tabela de vazão inicial máxima que um sulco pode receber, sem estar sujeito à erosão, em função de sua declividade; para a declividade mínima (0,5 por mil) a vazão máxima é de 4,0 L s⁻¹, enquanto que para a declividade máxima (5,0 por mil) é de 1,3 L s⁻¹. Segundo este autor a vazão reduzida vai depender da taxa de infiltração básica do solo, parâmetro que pode ser determinado por processos os mais diversos.

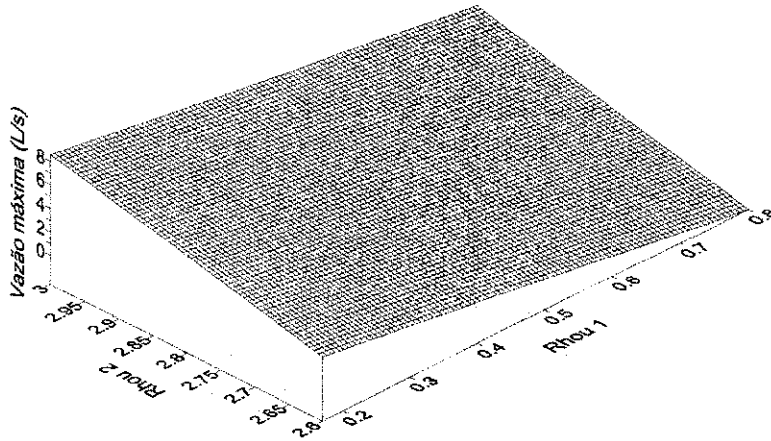


Figura 4.24. Sensibilidade do prognostico da vazão máxima não erosiva na irrigação por sulco com fluxo contínuo aos parâmetros empíricos da forma do sulco (ρ_1) e (ρ_2), para os dados de campo AMALGACQ

Tabela 4.9. Análise de sensibilidade do prognóstico da vazão máxima não erosiva, pelo modelo SASIS, com relação à variação dos parâmetros empíricos da forma do sulco (ρ_1) e (ρ_2), para os dados de campo AMALGACQ ($n = 0,04 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ e $S_o = 0,0066 \text{ m m}^{-1}$, velocidade máxima = 13 m min^{-1})

ρ_1	ρ_2										
	2,60	2,64	2,68	2,72	2,76	2,80	2,84	2,88	2,92	2,96	3,00
0,170	2,39	3,17	4,06	5,07	6,18	7,38	8,67	10,03	11,47	12,96	14,50
0,233	1,41	1,94	2,56	3,27	4,08	4,98	5,95	7,01	8,14	9,33	10,58
0,296	0,95	1,33	1,80	2,35	2,98	3,69	4,48	5,34	6,27	7,27	8,33
0,359	0,69	0,99	1,35	1,79	2,31	2,90	3,56	4,29	5,09	5,95	6,87
0,422	0,53	0,77	1,07	1,43	1,87	2,37	2,94	3,57	4,27	5,03	5,84
0,485	0,42	0,62	0,87	1,18	1,55	1,99	2,49	3,05	3,67	4,35	5,08
0,548	0,34	0,51	0,73	1,00	1,32	1,71	2,15	2,65	3,21	3,83	4,50
0,611	0,28	0,43	0,62	0,86	1,15	1,49	1,89	2,34	2,85	3,42	4,04
0,674	0,24	0,37	0,54	0,75	1,01	1,32	1,68	2,10	2,57	3,09	3,66
0,737	0,21	0,32	0,47	0,66	0,90	1,18	1,51	1,89	2,33	2,81	3,35
0,800	0,18	0,28	0,42	0,59	0,80	1,06	1,37	1,73	2,13	2,58	3,08

4.9. Apresentação do Software SASIS

O SASIS foi escrito na linguagem de programação DELPHI 5.0, escolhida por ser orientada a objeto, com integração total ao Windows em todas as suas versões, que permite, de maneira clara, prática, produtiva e eficiente, atualização e portabilidade de aplicativos nele desenvolvidos; oferece, também, significativa facilidade na utilização de Banco de Dados Relacionais, dispensando o trabalho de desenvolvimento de rotinas, controle de arquivos de dados/texto e periféricos de entrada/saída, possibilitando ao desenvolvedor foco total no trabalho específico, gerando códigos rápidos. Referida capacidade é extremamente importante na simulação e otimização da irrigação por superfície. Um diagrama de bloco é apresentado na Figura 4.25, exibindo de forma relativamente simplificada o algoritmo do software SASIS.

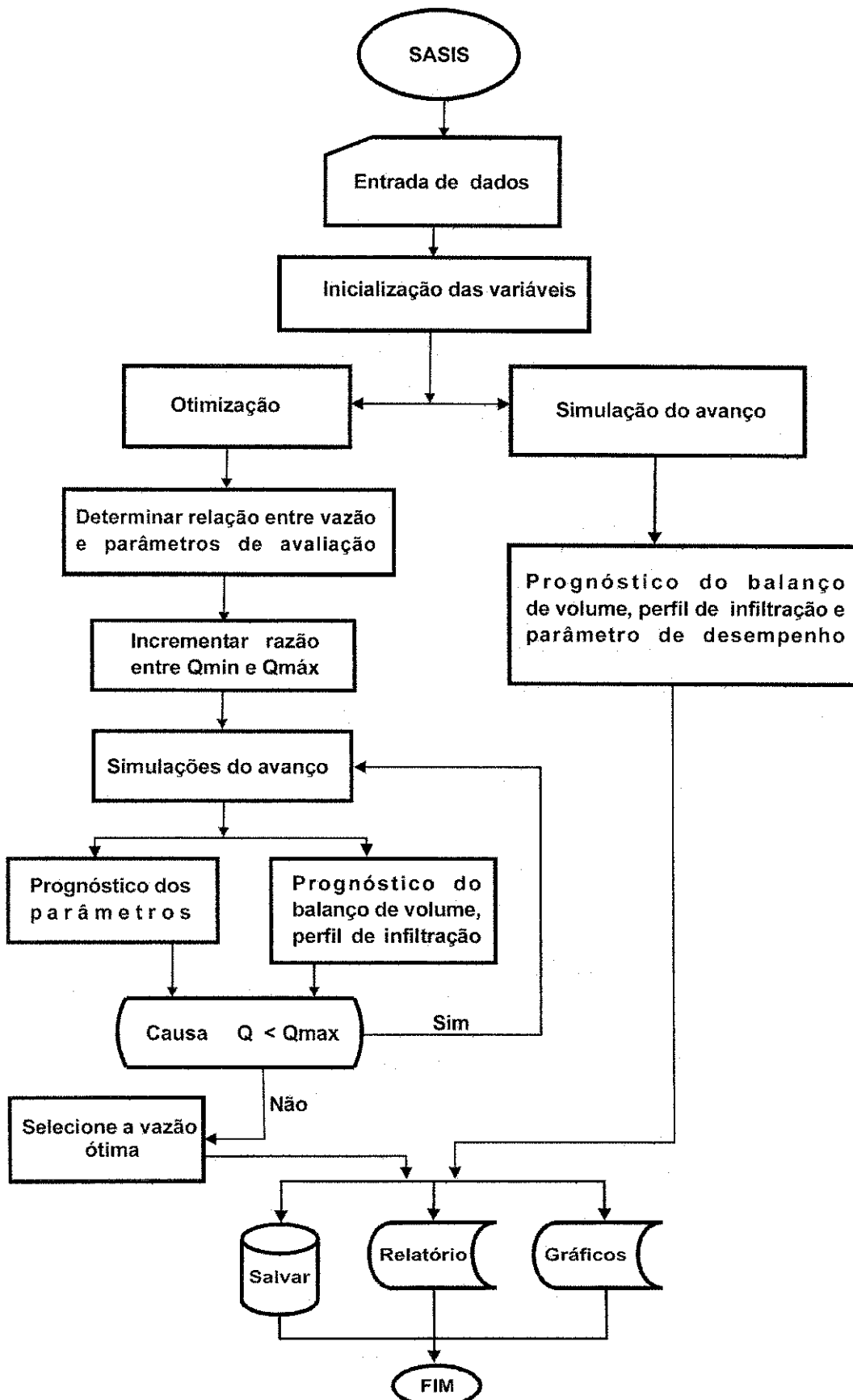


Figura 4.25. Fluxograma da seqüência de operacionalização do programa computacional do software SASIS

O SASIS é um software auto-explicativo, orientado a objetos, escrito para sistemas de microcomputadores compatíveis com o IBM, utilizando Windows 98, 2000, MILENIUM, XP, e sistemas operacionais subseqüentes. Opera com arquivo autoexecutável em um CD ROM. Sua instalação é simples: basta clicar no ícone “Instalador Sasis”: clique em avançar e em concluir; o software será, então, instalado no disco rígido do computador, podendo ser criado um ícone de atalho na área de trabalho, caso o usuário deseje. O software SASIS pode ser executado pelo comando do menu Iniciar do Windows, por duplo click no SASIS.EXE do Windows Explorer, ou clicando no ícone de atalho criado pelo usuário. Em qualquer caso, a primeira tela apresentada ao usuário será como mostra a Figura 4.26.

O Programa adota um modelo relacional de Banco de Dados, para a guarda e gerenciamento das informações envolvidas, e de uma ferramenta de desenvolvimento de programação orientada a objeto, visual. O software é apresentado operacionalmente, em um único módulo, seguindo o padrão Windows, e consta de um formulário principal (Figura 4.26); na parte superior tem-se duas opções: Cálculo e Sobre; na janela de cálculo, abre-se o programa para simulação e, na opção de sobre, dá-se informação sobre o programa.

4.10. Operação do Sistema

4.10.1. Cálculo

Esta é a arquitetura mais importante do sistema, composto de quatro janelas: Entrada de Dados, Resultados e Simulação, Apresentação Gráfica, e Vazão Ideal (Figura 4.27). Ao clicar na janela calcular do menu principal do SASIS, a tela Entrada de Dados é selecionada imediatamente; esta é a principal tela do programa, pois é a partir dela que são inseridos os dados de campo e os parâmetros operacionais, que serão utilizados na otimização do desempenho da irrigação por sulco com fluxo contínuo.



Figura 4.26. Tela de abertura do SASIS

Entrada de Dados: A introdução de dados no software SASIS ocorre através da tela de entrada de dados; os espaços em branco devem ser preenchidos pelos valores correspondentes a Dados de Campo: Geometria e Topografia do Campo, Função de Infiltração, e Parâmetros da Seção Hidráulica. A geometria e a topografia da superfície irrigada do campo são descritas pelos seguintes parâmetros: Comprimento do sulco; Espaçamento do sulco, e Declividade na direção do fluxo. A função de infiltração é um dos parâmetros mais críticos do software SASIS, uma vez que afeta todo o processo da irrigação e o uso incorreto deste parâmetro de campo pode mascarar o valor da performance da irrigação. A determinação da equação de infiltração pode ser feita mediante ensaio de campo por um dos métodos recomendados para irrigação por sulco ou ainda obtida pelo modelo SIRTOM; o usuário pode também recorrer a valores tabelados recomendados na literatura, de acordo com o tipo de solo. Os parâmetros da seção hidráulica compreendem a ρ_1 , ρ_2 , σ_1 , σ_2 , γ_1 e γ_2 . O primeiro campo em branco está reservado para o fluxo de entrada em $L s^{-1}$; além desses parâmetros existem espaços em branco para serem preenchidos com a lâmina requerida e incremento de simulação.

4.10.2. Simulação

Uma vez introduzidos os dados de campo, a simulação é executada clicando-se no botão Simular. O programa calculará, então, o avanço da água no sulco, tempo de oportunidade de infiltração da água no solo, tempo de aplicação d'água, lâmina infiltrada no perfil do solo ao longo da área, balanço de volume, avaliando por último a performance do sistema de irrigação. Os resultados são armazenados em um arquivo que poderá ser acessado a qualquer momento pelo usuário, bastando apenas selecionar o arquivo, com um click. Esses arquivos ficam na tela Entrada de Dados, na parte inferior; basta usar a barra de rolagem ou as teclas de avançar e retroceder. Para inserir novos dados de campo, é necessário clicar no ícone Novo, em que se tem a opção Excluir e Sair; as outras três janelas: Resultado da Simulação, Apresentação Gráfica e Vazão Ideal, podem ser acessadas com um simples click no ícone escolhido.

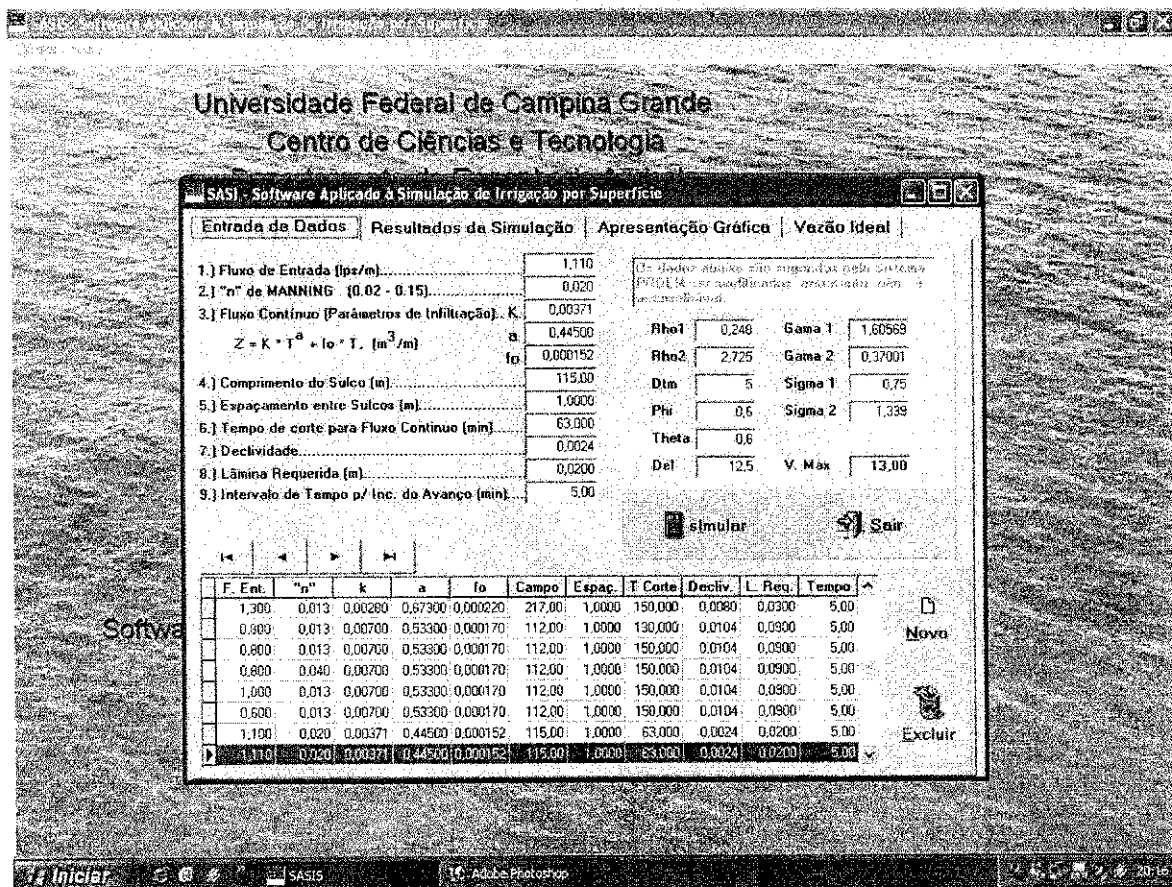


Figura 4.27. Tela de inserção de dados de campo para a simulação da irrigação por sulco com fluxo contínuo e otimização de sua performance

A janela Resultado da Simulação mostra, na tela, os resultados da simulação do avanço da água no sulco, tempo de recessão, perfil de infiltração da água no solo, balanço de volume, e a performance da irrigação. Esta tela apresenta, ainda, as opções Imprimir e Sair; clicando em Imprimir, um relatório é fornecido com todos os valores da simulação, inclusive os dados de entrada de campo e os parâmetros operacionais (Figura 4.28).

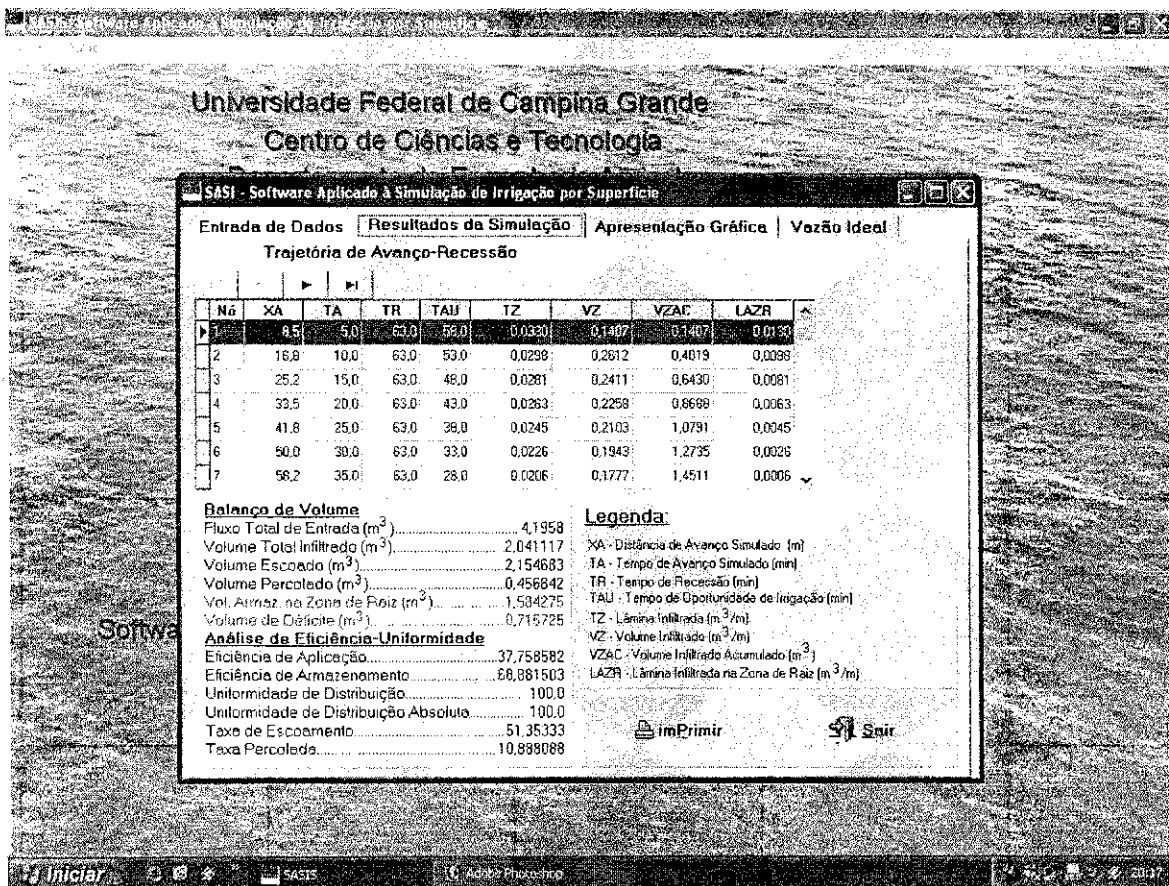


Figura 4.28. Tela exibindo os resultados da simulação do software SASIS

O software SASIS inclui não apenas a capacidade de gerar a parte gráfica mas, também, a impressão. O relatório pode ser impresso; basta dar um simples click no ícone imPrimir, que se encontra na parte inferior da tela. O relatório é visualizado na tela do computador. Na barra superior da tela, no canto esquerdo, tem-se as opções de visualização ampliada, normal ou reduzida; em seguida, na cor vermelha apresentam-se os botões de avançar e retroceder páginas, também nesta barra, encontram-se as opções de salvar, abrir arquivo e fechar. O relatório só é impresso confirmando esta tarefa com um click em um dos ícones de impressora, que se encontra na barra superior da tela. O

relatório informa todos os dados de campo (dados de entrada) fornecidos pelo usuário para conferência e o resultado da simulação do avanço, recessão, perfil de infiltração, balanço de volume, e a performance da irrigação. No balanço de volume são informados, ao usuário os seguintes parâmetros: Fluxo Total de Entrada, Volume Total Infiltrado, Volume Escoado, Volume Percolado, Volume Armazenado na Zona de Raiz, e Volume de Déficit. No resultado da performance são informados, ao usuário, os parâmetros: Eficiência de Aplicação, Eficiência de Armazenamento, Uniformidade de distribuição, Uniformidade de Distribuição Absoluta, Taxa de Escoamento, e Taxa de Percolação (Figuras 4.29 e 4.30).

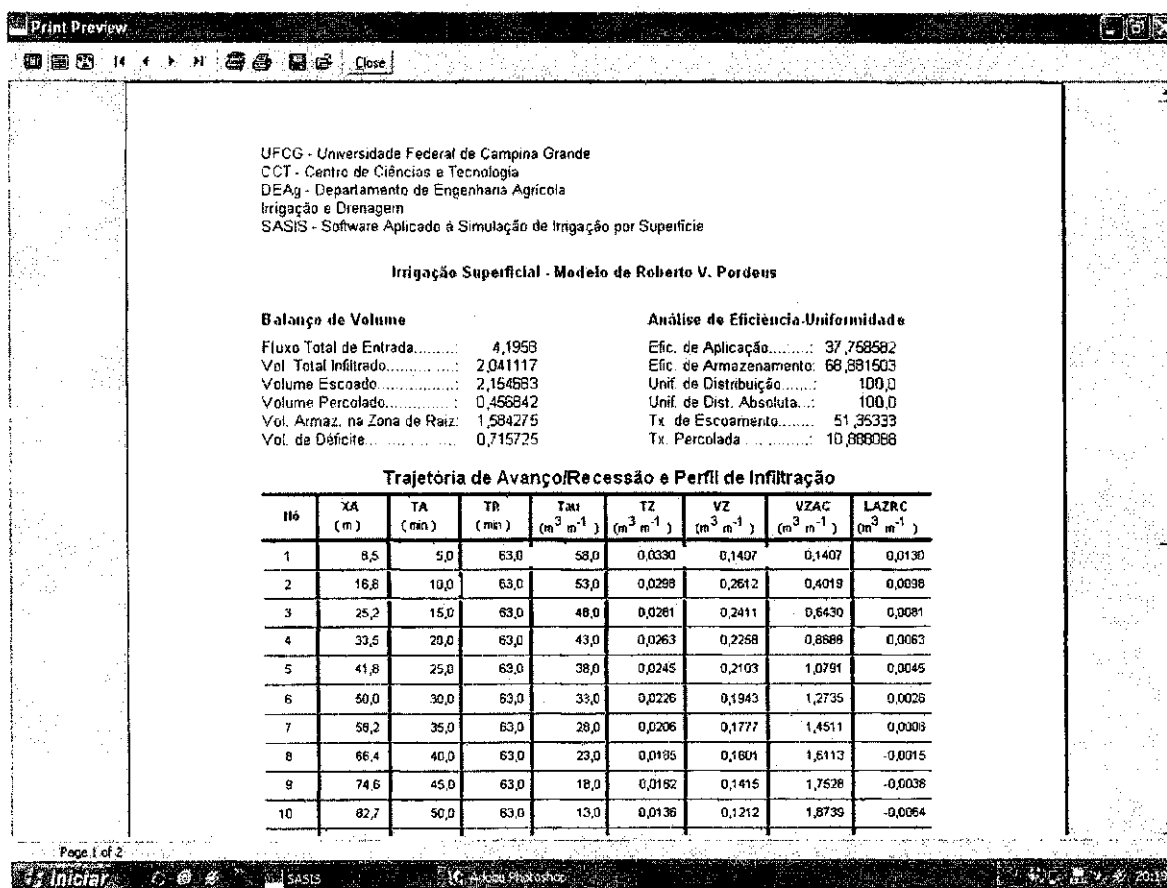


Figura 4.29. Tela de visualização da primeira página de um relatório dos dados da simulação da irrigação por sulco com fluxo contínuo e do prognóstico de sua performance

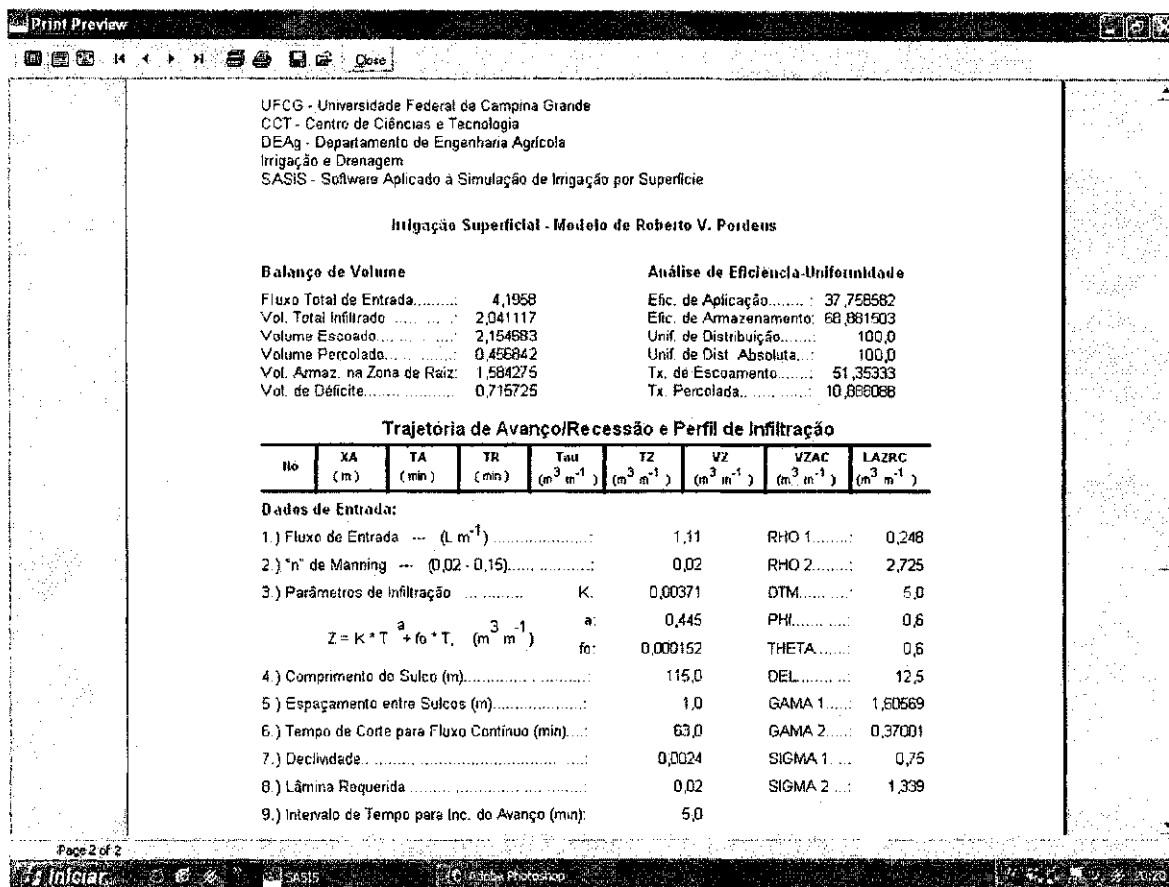


Figura 4.30. Tela de visualização da segunda página de um relatório dos dados da simulação da irrigação por sulco com fluxo contínuo e do prognostico de sua performance

Uma vez introduzidos os dados de campo, a simulação é executada e gerados os gráficos da curva de avanço da água no sulco e do perfil de infiltração da água no solo. Na tela de Apresentação Gráfica, tem-se três opções de visualização de resultados e uma de voltar. Na opção de visualização de resultados pode-se escolher entre visualizar a trajetória do avanço, clicando sobre o ícone Avanço/Tempo; a trajetória de avanço é mostrada na tela (Figura 4.31); para visualizar na tela o gráfico do perfil infiltrado, clica-se no ícone Lâmina (Figura 4.32), e, para visualizar e imprimir o relatório da infiltração dando um click no ícone Imprimir, o relatório será visualizado na tela; para confirmar sua impressão, clica-se em um dos ícones de impressão apresentados na barra, que se encontra na parte superior da tela (Figura 4.33). A barra localizada na parte superior desta tela apresenta as seguintes opções: visualizar impressão normal, visualizar impressão reduzida ou ampliada, avanço e retrocesso de página, salvar, abrir arquivo e fechar. A curva de avanço é gerada pelo par ordenado (x,y), em que no eixo dos x são plotados os valores da

distância de avanço da água ao longo do sulco, em metro, e no eixo dos y são plotados os tempos de avanço da água, em minutos (Figuras 4.31).

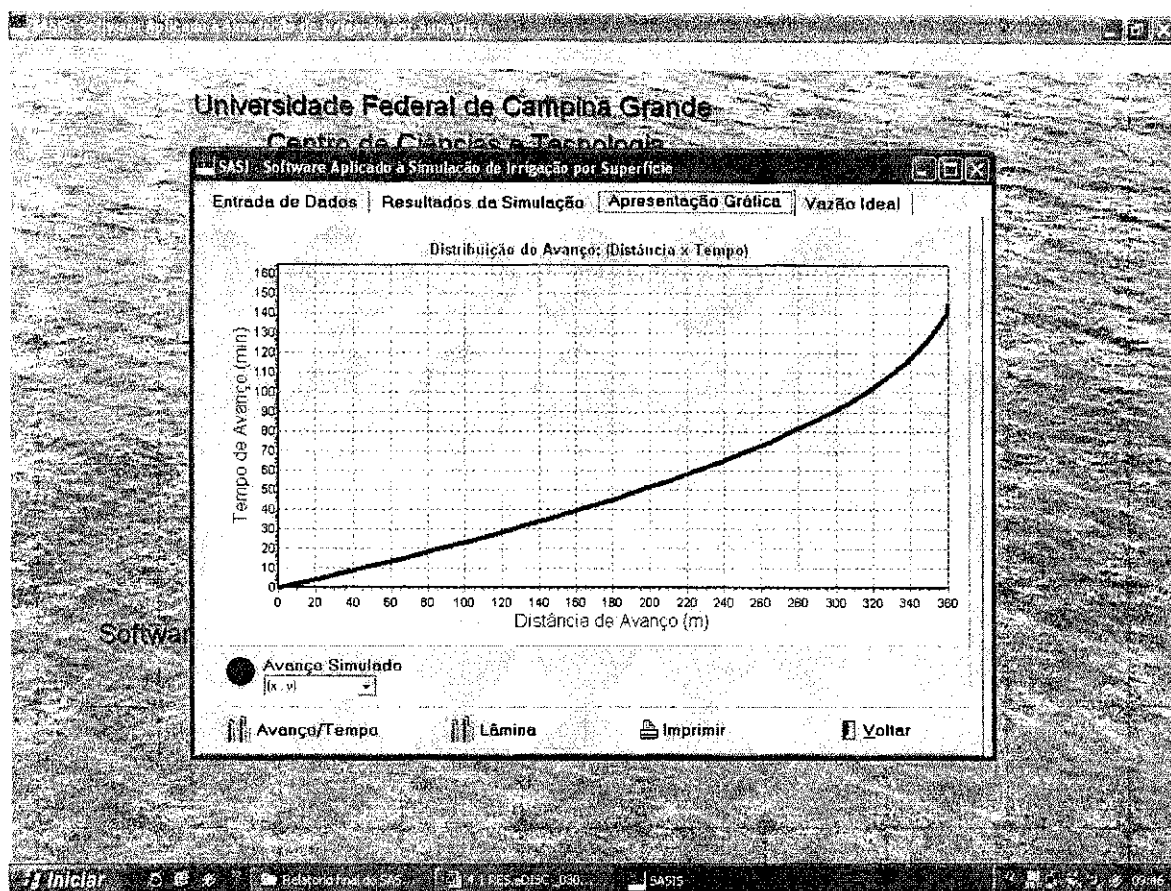


Figura 4.31. Tela de visualização da trajetória de avanço da água ao longo do sulco

A tela de lâmina é ilustrada conforme apresentado na Figura 4.32. A infiltração de projeto requerida é plotada como Z_{req} representado por uma linha de cor preta, de forma que, quando uma Lâmina infiltrada exceder este valor, o usuário verificará a perda da água de irrigação por percolação profunda (o perfil de infiltração apresenta-se na cor verde, para melhor identificação); quando o perfil infiltrado sobrepuser à linha de cor preta, que identifica a Lâmina requerida de projeto, o usuário identificará a região da área, que apresenta déficit de irrigação.

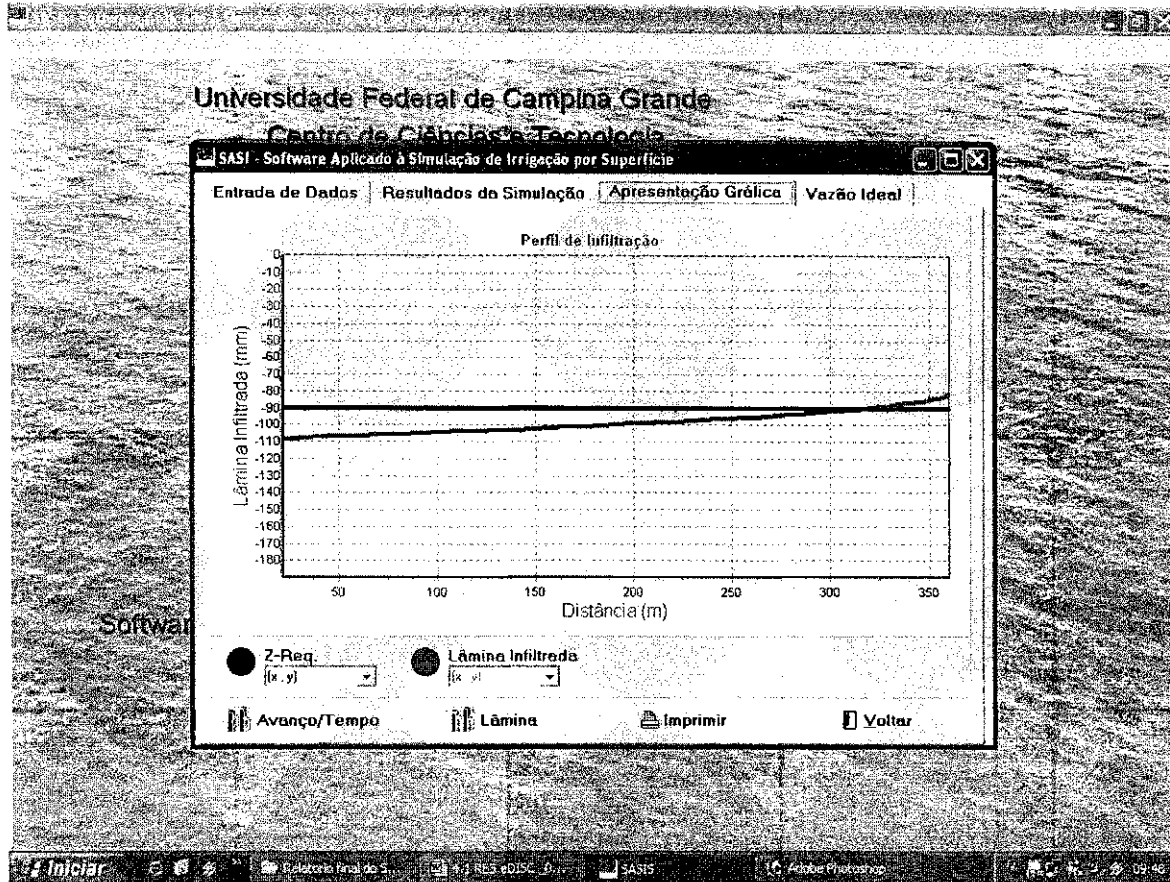


Figura 4.32. Tela de visualização do perfil de infiltração da água no solo em irrigação por sulco com fluxo contínuo

Na tela da Figura 4.33 visualiza-se um relatório do perfil de água infiltrado no solo; a impressão deste relatório é feita clicando-se sobre um dos ícones de impressão localizados na barra superior da tela. O perfil de infiltração é obtido através da equação de infiltração de Kostiakov-Lewis e o gráfico gerado pelo par ordenado (x,y) , em que no eixo dos x são plotadas as distâncias ao longo do sulco, em metro e, no eixo dos y são plotadas as lâminas infiltradas no perfil do solo, em milímetro.

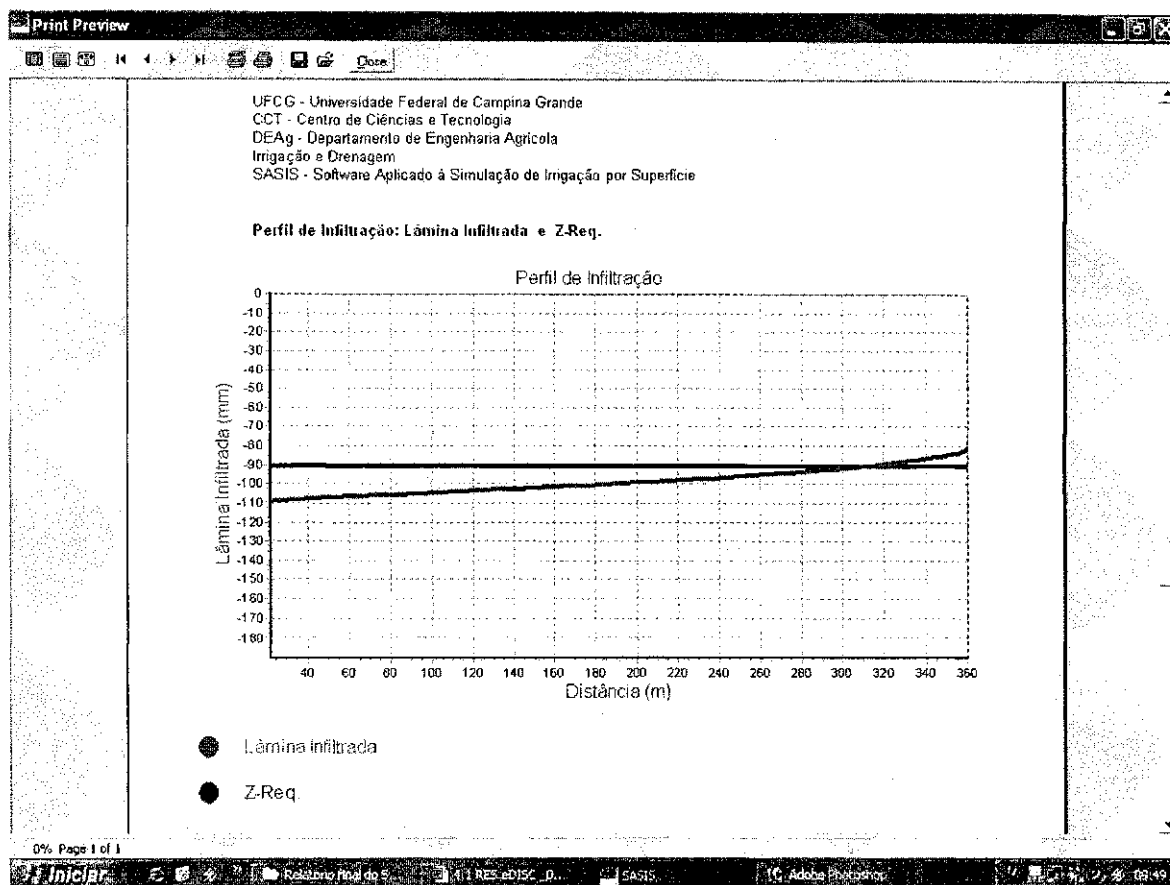


Figura 4.33. Tela de visualização do relatório do perfil de infiltração da água no solo em irrigação por sulco com fluxo contínuo

4.10.3. Vazão Ótima

O software SASIS, além de gerar simulações do processo da irrigação por sulco com fluxo contínuo e drenagem livre, no final da área, fornecendo sua performance, inclui também a capacidade de gerar uma vazão ótima, ou seja, aquela que maximiza o desempenho do sistema. Na Figura 4.34 é visualizada a tela, que apresenta o módulo da vazão ótima. No espaço em branco que se encontra na parte superior desta tela, o usuário pode inserir uma vazão de entrada mínima, isto é, aquela que garante que a água atinja o final da área; em seguida, clicar no ícone Vazão Ótima; o software calculará a vazão máxima não erosiva internamente e desenvolverá a simulação da irrigação para diferentes valores de vazão gerados pelo programa, que variam entre a vazão mínima e a máxima permitidas, e apresentará valores para os parâmetros da performance do sistema de irrigação para cada vazão utilizada na simulação, gerando um gráfico, no qual são plotados, no eixo dos x os valores de vazão calculados pelo programa em $L s^{-1}$ e, no eixo

dos y , os valores da eficiência de aplicação, taxa de escoamento e taxa de percolação, em %. Na tela são exibidos um gráfico e um relatório da performance da irrigação. O software indicará a vazão que se enquadra como ótima, ou seja, aquela que resultar na maior eficiência de aplicação, provavelmente com o mínimo de escoamento superficial.

Na tela são apresentados, além da vazão mínima fornecida pelo usuário, o valor da Vazão Máxima Determinada e da Vazão Ótima. No lado direito da tela são mostrados os valores de vazão utilizados na simulação do software e os respectivos valores dos parâmetros da performance. Nesta tela, acima do gráfico, apresentam-se três botões: Gráfico, vAzões e Voltar. Clicando no botão Gráfico, o software abrirá a tela representada na Figura 4.35.

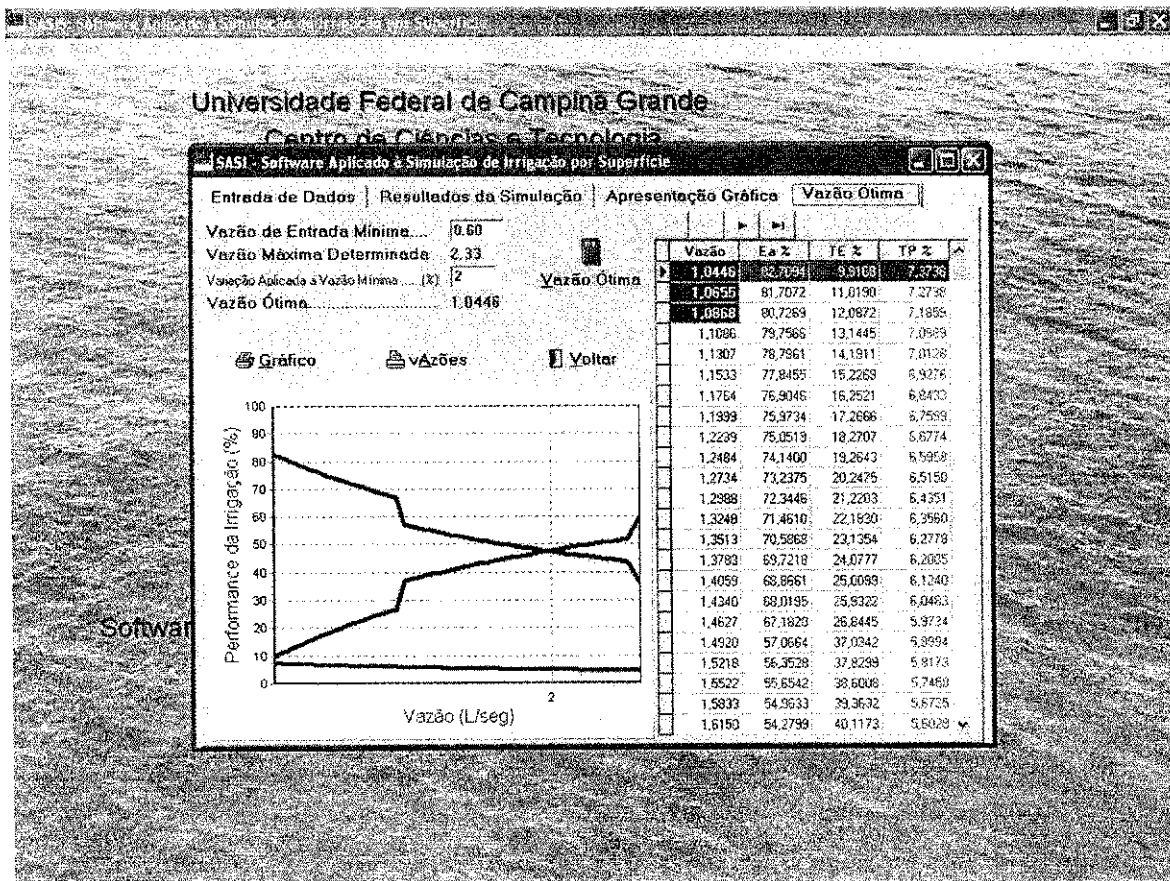


Figura 4.34. Tela de visualização do processo de otimização da performance da irrigação por sulco com fluxo contínuo

Na tela visualizada na Figura 4.35 tem-se o gráfico do relatório da performance da irrigação, para vazão compreendida entre a vazão mínima, fornecida pelo usuário, e a vazão máxima não erosiva calculada internamente pelo programa; a impressão deste relatório é feita após a confirmação do usuário, clicando-se sobre um dos ícones de impressão localizada na barra superior da tela. Os gráficos da performance da irrigação são gerados pelo par ordenado (x,y) , em que no eixo dos x são plotadas as vazões em $L s^{-1}$ e, no eixo dos y , são plotados os parâmetros da performance da irrigação, ou seja, eficiência de aplicação, taxa de escoamento e taxa de percolação, em %. No final da página é apresentada uma legenda dos parâmetros da performance da irrigação, com identificação do valor da vazão ótima.

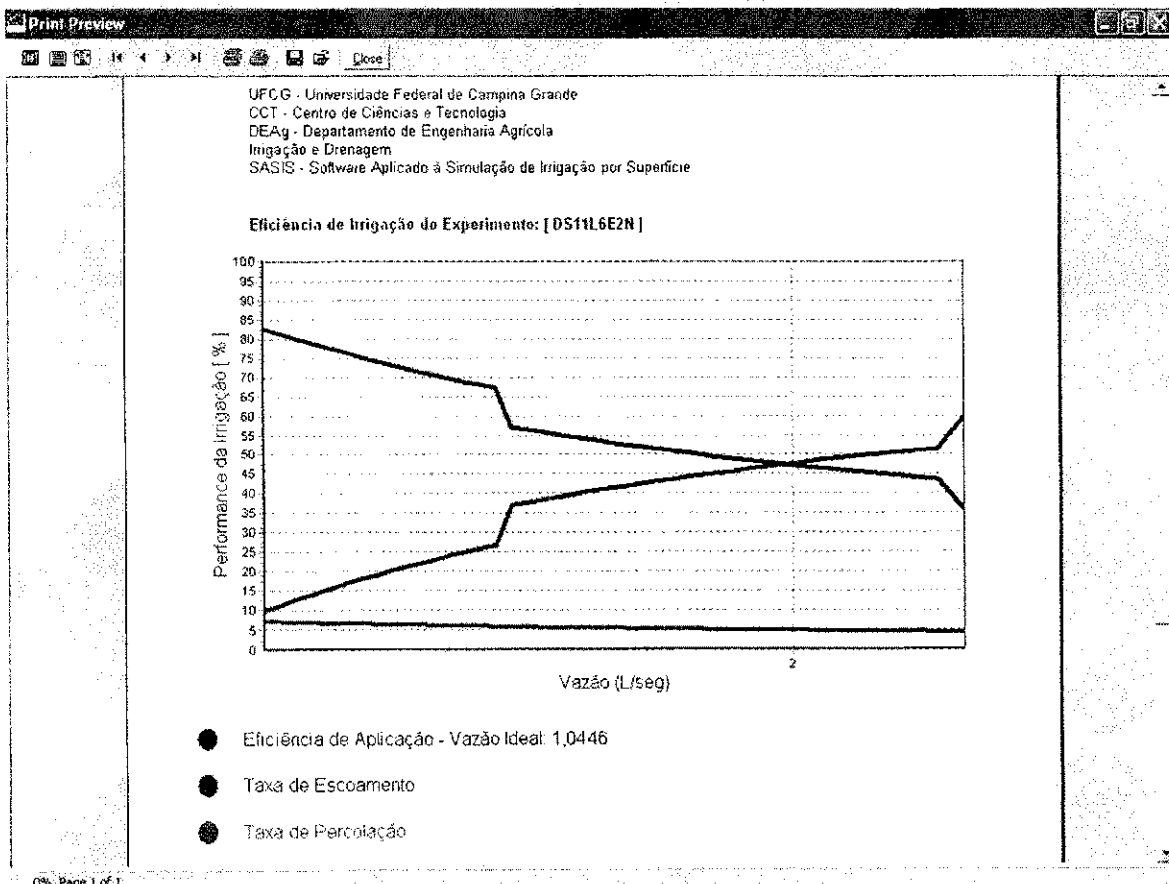


Figura 4.35. Tela de visualização da página 1 do relatório da otimização da performance da irrigação por sulco com fluxo contínuo

A tela visualizada na Figura 4.36 apresenta o relatório do cálculo da vazão ótima, os valores da vazão utilizada em projeto inserida pelo usuário, vazão máxima não erosiva e a vazão ideal calculadas pelo programa, além de fornecer a relação das vazões e dos parâmetros da performance simulados dentro do intervalo de vazão compreendido entre a vazão mínima inserida pelo usuário e a vazão máxima não erosiva calculada pelo programa. No relatório, as vazões que se enquadram como vazão ótima são identificadas em negrito.

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande
 CCT - Centro de Ciências e Tecnologia
 DEAg - Departamento de Engenharia Agrícola
 Irrigação e Drenagem
 SASIS - Software Aplicado à Simulação de Irrigação por Superfície

Irrigação Superficial - Modelo de Roberto V. Pordeus

Determinação da Vazão Ótima

Fluxo Total de Entrada/Vazão de Entrada..... 1,33
 Vazão Máxima Determinada..... 2,33
 Variação Percentual Aplicada a Vazão de Entrada: 2 %

Vazão Ótima..... 1,0446

Nome do Experimento: [DS11LBE2N]

Vazão	Efic. de Aplicação Ea (%)	Tx de Escoamento Te (%)	Tx de Percolação Tp (%)
1,0446 V.I.	82,7094	9,9168	7,3738
1,0655 V.I.	81,7072	11,0190	7,2738
1,0868 V.I.	80,7269	12,0872	7,1859
1,1086	79,7586	13,1445	7,0989
1,1307	78,7961	14,1911	7,0128
1,1533	77,8455	15,2269	6,9276
1,1764	76,9046	16,2521	6,8433
1,1999	75,9734	17,2666	6,7599
1,2239	75,0519	18,2707	6,6774
1,2484	74,1400	19,2643	6,5958

Page 1 of 2

Figura 4.36. Tela de visualização da página 2 do relatório da otimização da performance da irrigação por sulco com fluxo contínuo

4.10.4. Características Gerais

4.10.4.1. Configuração exigida pelo Sistema

Microcomputador compatível com IBM PC, Pentium, com 64 Mbytes de memória RAM, uma unidade de CD ROM, recomendável, uma unidade de disco rígido, Winchester, de no mínimo 5 Giga Bytes, uma unidade de disco flexível de alta densidade,

Impressora Jato de Tinta, para melhor visualização dos relatórios, ou Matricial de 80 ou 132 colunas e Sistema Operacional Windows 98 ou posterior.

4.11. Código Fonte

Por ser a ferramenta de programação adotada, complexa, anexam-se-lhe os Códigos Fonte do módulo principal do SASIS, no modelo analítico (Anexo II).

Para concluir este capítulo de Resultados e Discussão, apresenta-se abaixo texto escrito pelo Professor Carlos Alberto Vieira de Azevedo (um dos orientadores desta pesquisa), fornecido em mãos, que enfatiza a engenhosidade requerida na elaboração de um modelo matemático computacional para a irrigação superficial:

Ao se escrever um código computacional para um modelo matemático que simule o fluxo d'água na irrigação superficial, que a rigor é não permanente, não uniforme e espacialmente variado, governado, então, por equações diferenciais parciais do tipo hiperbólico (equações de Saint-Venant), primeiramente obtêm-se um produto bruto provavelmente com inconsistências e vulnerabilidades, carecendo, a partir daí, uma análise criteriosa tanto sobre a atribuição de valores para determinadas variáveis como a respeito dos mecanismos codificadores que dão vida aos processos matemáticos envolvidos na simulação, capaz de lapidá-lo objetivando o aperfeiçoamento de seus prognósticos e de sua versatilidade de cunho prático e usual (Carlos A. V. Azevedo, 2005).

5 – CONCLUSÕES

1. As simulações da fase de avanço pelo modelo SASIS apresentaram discrepâncias no tempo de avanço no final da área inferiores às identificadas pelo modelo SIRMOD, que não comprometeram o prognóstico do balanço de volume d'água, perfil de infiltração d'água e dos parâmetros de desempenho do sistema de irrigação por sulco com fluxo contínuo.
2. A qualidade da simulação da fase de avanço na irrigação por sulco com fluxo contínuo é prejudicada para grandes valores de incrementos de tempo da simulação.
3. A análise de sensibilidade da simulação da fase de avanço na irrigação identificou faixas de combinações entre os fatores de ponderação espacial e temporal do perfil superficial e subsuperficial de fluxo que resultaram em discrepâncias toleráveis entre os tempos de avanço simulados e medidos, constatando-se, ainda, efeito conjugado desses fatores na simulação da fase de avanço, sendo maior o efeito do fator de ponderação temporal.
4. As simulações da fase de recessão pelo modelo SIRMOD atestaram a validade da hipótese assumida no modelo SASIS em negligenciar esta fase, considerando que o término do evento de irrigação ocorre no momento da suspensão do fornecimento de água ao sulco.
5. A análise de sensibilidade da equação de vazão máxima utilizada na irrigação por sulco com fluxo contínuo identificou faixas de combinações entre a rugosidade da superfície

do solo e sua declividade e entre os parâmetros empíricos da seção transversal de fluxo (ρ_1 e ρ_2), que resultam em vazões máximas impraticáveis, verificando-se, também, efeito conjugado entre a rugosidade e a declividade e entre ρ_1 e ρ_2 , sendo os maiores efeitos da rugosidade e de ρ_2 .

6. A vazão aplicada em sistemas de irrigação por sulco com fluxo contínuo, as perdas por escoamento são bem mais sensíveis às variações de vazão em relação as perdas por percolação, ao ponto de se tornarem dominantes, para as condições de campo estudadas, os melhores índices de eficiência de aplicação d'água foram obtidos para vazões próxima da vazão mínima, para condições de irrigação adequada.
7. O parâmetro de campo que mais dificulta a otimização do desempenho da irrigação foi a infiltração, enquanto o comprimento e a declividade não interferiram de forma decisiva na otimização, podendo a mesma ser alcançada para uma grande faixa de valores desses parâmetros; constatando-se, que em solos com elevadas taxas de infiltração, a maior dificuldade na otimização é minimizar as perdas por percolação; já nos solos com baixas taxas de infiltração tanto as perdas por percolação como por escoamento podem ser facilmente minimizadas.
8. O SASIS apresenta mecanismos eficazes na realização de inúmeras simulações, numa faixa de vazão compreendida entre a mínima e a máxima permitidas, objetivando-se determinar a relação entre vazão e eficiência de aplicação d'água, taxas de percolação e de escoamento, e conseqüentemente otimizar o desempenho do sistema de irrigação por sulco com fluxo contínuo.

6 – RECOMENDAÇÕES

1. Criar no modelo mecanismo capaz de realizar prognósticos da performance da irrigação para sistema de irrigação por faixas e tabuleiros.
2. Desenvolver mecanismo de realizar prognósticos da performance da irrigação por sulco bloqueado no final da área.
3. Contemplar o modelo, no caso de sistema de irrigação por sulco com redução de vazão.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, D.V. de; Botrel, T.A.; Paz, V.P. da S.; Frizzone, J.A. Modelo matemático para simulação da fase de avanço na irrigação por sulcos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.2, n.1, p.56-62, 1998.

ASCE. Describing irrigation efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE, 104(IR1):35-41. 1978.

Augusto, S.G.; Souza, F. de; Costa, J.O. Eficiência e uniformidade de distribuição da água de irrigação por sulcos em declive. *Engenharia Agrícola*, Botucatu, v.9, p.7-17, 1985.

Azevedo, C.A.V. de. Real-time solution of the inverse furrow advance problem. Ph.D. Dissertation, Agricultural and Irrigation Engineering Department, Utah State University, Logan, Utah, USA, 263p. 1992.

Azevedo, C.A.V. de.; Walker, W.R. Modelagem em sistema de checagem e controle de irrigação por sulcos. In: XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, 1993, Anais Ilhéus: v.IV, p.2193-2208, 1993.

Azevedo, C.A.V. de; Merkley, G. P.; Walker, W. R.. Otimização não-linear em sistemas de checagem e controle da irrigação por sulcos. In: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, VIÇOSA. RESUMOS,. p. 171. 1995.

Azevedo, C.A.V. de; Walker, W.R.; Merkley, G.P. Modelo de ondas cinemáticas na solução do problema inverso da irrigação por sulco em tempo real. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.1, p.35-41, 1997a.

Azevedo, C.A.V. de; Walker, W.R.; Merkley, G.P. Otimização não-linear na Solução do Problema Inverso da Irrigação por Sulcos em Tempo Real. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.1, p.43-49, 1997b.

Azevedo, C.A.V. de; Pordeus, R.V.; Lima, V.L.A. de; Dantas Neto, J. Behavior of the optimal discharge in furrow discharge in furrow irrigation with continuous flow. 2001 ASAE Annual International Meeting, Sacramento, California, USA, paper n. 012165 p.1-13, 2001.

Azevedo, C.A.V. de.; Pordeus, R.V.; Lima, V.L.A. de.; Dantas Neto, J.; Azevedo, H.M. de. Efeito do tempo de aplicação das lâminas requeridas na eficiência de aplicação d'água do sistema de irrigação por sulco. XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, Juazeiro, CDRom, p. 1-7, 2003a.

Azevedo, C.A.V. de.; Pordeus, R.V.; Silveira, J.I.; Lima, V.L.A. de.; Dantas Neto, J. Influência da lâmina requerida no desempenho da irrigação por sulco. Irriga, Botucatu, v.8, n.1, p.44-50, 2003b.

Azevedo, C.A.V. de.; Pordeus, R.V.; Lima, V.L.A. de.; Dantas Neto, J.; Silveira, J.I. Efeito do tempo de oportunidade de infiltração e do comprimento do sulco no tempo de aplicação d'água para diferentes tipos de solos. XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Goiânia, CDRom, p. 1-4, 2003c.

Bautista, E.; Wallender, W.W. Optimization of Furrow Infiltration Parameters from Advance Times and Advance Rates. Presented at the July 22-26, ASCE National Conference held at Honolulu, Hawaii. 1991.

Bassett, D.L. A Mathematical Model of Water Advance in Border Irrigation. Transactions of the ASAE, 15(5): 992-995, 1972.

Bassett, D.L.; Fitzsimmons, D.W. Simulating Overland Flow in Border Irrigation. Transactions of the ASAE. 19(4): 674-680, 1976.

Bassett, D.L.; Fangmeier, D.D.; Strelkoff, T. Hydraulics of Surface Irrigation. In: Design and Operation of Farm Irrigation Systems. ASAE. Monograph nº 3, p.447-498. 1983.

Bassett, D.L.; Fangmeier, D.D.; Strelkoff, T. Hidraulics of surface irrigation. In: Jemsen, M.E. Design and operation of farm irrigations systems. St. Joseph. The American Society of Agricultural Engineers, cap.12, p.447-498, 1983.

Beckett, P.H.T.; Webster, R. Soil variability: a review. Soils Fertilizers. Oxford. n.34, p.1-15, 1971.

Bernardo, S. Manual de irrigação. 6.ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1995, 657p.

Bjorneberg, D.; Strelkoff, T. Furrow Irrigation Data Needs for Simulating Erosion and Evaluating Erosion Models. The Society for engineering in agricultural, food, and biological systems. ASAE Annual International Meeting. Sacramento, Califórnia, USA. paper n.01-2257, p.1-7, 2001.

Bishop, A.A.; Walter, W.R.; Allen, N.L.; Poole, G.J. Furrow advances rate under surge flow systems. Journal of the irrigation and drainage division, ASCE, 107(3): 257-264, 1981.

Botrel, T.A. & Marques, P.A.A. Software para dimensionamento de irrigação por sulcos. Scientia Agrícola. v.57, n.4. p.803-811, 2000.

Booher, L.J. Surface Irrigation. Development paper No. 95, Land and Water Development Series No. 3. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1974.

Bos, M.G.; Nugteren, J. On Irrigation Efficiencies., Internacional Institute for Land Reclamation and Improvement. ILRI, Wageningen, The Netherlands. 1974. Publication No. 19.

Bowman, J.A. Irrigation in Midwest: Lessons from Illinois. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 117(5): 700-715, 1991.

- Burt, C.M.; Clemmens, A.J.; Strelkoff, T.S.; Solomon, K.H.; Bliesner, R.D.; Hardy, L.A.; Howell, T.A. Eisenhauer, D.E. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 123(IR6): 423-442. 1997.
- Castro, N. Notas de Aula de Irrigação e Drenagem, IPH, UFRGS. Versão Preliminar baseado em Salassier (1989), 2001.
- Camacho, G.J.M.; Muñoz, H.B.; Acosta, H.R. Solución numérica del problema inverso avance-infiltración (Green y Ampt) en riego por gravedad. In: XVII CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, Guayaquil, Equador, v.5, p.341-351, 1996.
- Carvalho, D.F. de. Simulação da Infiltração de Água no Solo e da Irrigação por Superfície, com Aplicação Intermitente, Utilizando o Modelo Zero-Inércia. Viçosa, UFV (Dissertação de Mestrado), p.83, 1994.
- Carvalho, D.F. de; Soares, A.A.; Ramos, M.M.; Martins, J.H. Simulação das fases de avanço e recessão nas irrigações contínua e intermitente, utilizando o modelo zero-inércia. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v.1, n.34, p.1-13, ISSN 0103-9806, 1994.
- Carvalho, D.F. de; Oliveira, L.F.C. de; Pruski, F.F.; Soares, A.A.; Montovani, E.C. Influência do perfil geométrico do sulco no desempenho da irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Resumo. SBEA. N.95-3-222, 1995.
- Carvalho, J.J. de. Efeito da variação espacial e temporal do tempo de aplicação no desempenho do sistema de irrigação por sulcos. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1998. 102p. (Dissertação de Mestrado).
- Carvalho, J.J.; Azevedo, C.A.V. de; Barreto, A.N; Gomes, E.M.; Dantas Neto, J. Efeito da variação da velocidade de infiltração básica na estimativa da infiltração acumulada num solo franco-arenoso. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Anais Poços de Caldas-MG: v.II, p.127-129, 1998a.
- Carvalho, J.J.; Azevedo, C.A.V. de; Barreto, A.N; Bezerra, J.R.C.; Dantas Neto, J. Efeito da variação espacial e temporal dos parâmetros k e a da equação de Kostiaikov-Lewis na infiltração acumulada num solo franco-arenoso. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Anais Poços de Caldas-MG: v.II, p.136-138, 1998b.
- Carvalho, J.J.; Azevedo, C.A.V. de; Barreto, A.N; Henrique, J.; Dantas Neto, J. Variação espacial e temporal no desempenho de um sistema de irrigação por sulcos num solo franco-arenoso. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Anais Poços de Caldas-MG: v.II, p.139-141, 1998c.
- Carvalho, J.J. de; Azevedo, C.A.V. de; Barreto, A.N.; Henrique, J.; Azevedo, H.M. de. Desuniformidade espaço-temporal no desempenho do sistema de irrigação por sulco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.3, n.1, p.18-25, 1999.
- Carvalho, J.J. de; Azevedo, C.A.V. de; Henrique, J.; Dantas Neto, J.; Lima, V.L.A. de; Pordeus, R.V. Variabilidade espacial e temporal da seção transversal de escoamento superficial em sulcos de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.7, n.1, p.1-6, 2003.
- Carvalho, J.J. de; Azevedo, C.A.V. de; Henrique, J.; Dantas Neto, J.; Lima, V.L.A. de; Pordeus, R.V. Reflexos da variabilidade espacial e temporal da fase de avanço e do tempo

de oportunidade de infiltração no tempo de aplicação d'água na irrigação por sulcos para um solo franco-arenoso. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.24, n.2, p.455-463, 2004.

Chen, C.L. Discussion of 'A solution of the irrigation advance problem' by Otto Wilke and Ernest T. Smerdon. *Journal of Irrigation and Drainage Division*. ASCE, 92(2):97-101, 1966.

Chen, C.L. Surface irrigation using kinematic-wave method. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, ASCE, 96(IR1):39-46, 1970.

Childs, J.L.; Wallender, W.W.; Hopmans, J.W. Spatial and seasonal variation of furrow infiltration. *Journal of the Irrigation And Drainage Engineering*, ASCE, 119(1): 74-90, 1993.

Christofidis, D. Situação das áreas irrigadas: Métodos e equipamentos de irrigação, Brasília.1999.

Chow, V.T. Open-channel hydraulics. Ed.22. Singapore, McGraw-Hill,. 1986. 680p.

Clemmens, A.J.; Cope, T.; Do, P.; Schmidt, B., SRFRR version 20.991. USDA -ARS: USCWL. Phoenix, AZ, 1995.

Clemmens, A.J. Verification of the zero-inertia model for surface irrigation. *Transactions of the ASAE*, 22(6): 1306-1309, 1979.

Clemmens, A.J.; Burt, C.M. Accuracy of irrigation efficiency estimates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 123(IR6): 443-453. 1997.

Clemmens, A.J.; Solomon, K.H. Estimation of global irrigation distribution uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 123(IR6): 454-461. 1997.

Clyma, W.; Ali, A.; Ashraf, M.M. Irrigation Practices and Application Efficiencies in Pakistan. Water Management Technical Report No. 39. Colorado State University, Fort Collins, Colorado. 1975.

CODEVASF .Desenvolvimento do Vale do São Francisco. http://www.codevasf.gov.br/menu/os_vales/historico, 1996.

Criddle, W.D.; Davis, S.; Pair, C.H.; Shockley, D.C. Methods for evaluating systems. *Agriculture Handbook n°2*, SCS, USDA, USA. 1956.

Christiansen, J.E.; Bishop, A.A.; Kiefer, F.W.J.; Fok, Y.S. Evaluation of Intake Rate Constants as Related to Advance of Water in Surface Irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage*, ASCE, 9(5): 671-674, 1966.

Daker, Irrigação e Drenagem. ed.7. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1988. 543p. (A água na agricultura, v3).

Eldeiry, A.; Garcia L.; El-Zaher, A.S.A.; Kiwan, M. E.S. Furrow Irrigation System Design for Clay Soils in Arid Regions. *Hydrology Days*, p.42-54, 2004.

Elliott, R.L.; Walker, W.R. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 25(2): 396-400, 1982.

Elliott, R.L.; Walker, W.R.; Skogerboe, G.V. Zero inertia modeling of furrow irrigation advance. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, 108(IR3): 179-195, 1982.

- Esfandiari, M.; Maheshwari, B.L. Field Evaluation of Furrow Models. *Journal Agricultural Engineering Res.* (2001) 79(4), 459-479. <http://www.idealibrary.com.on>.
- FAO. Production Year Book, El Riego En América Latina y el Caribe en Cifras, Reports 20, Roma, 365p., 2000.
- Farmwide Furrow irrigation. <http://farmawide.com.au/nff/cotton/education/furrow.html>. (23 janeiro 2002).
- Fischback, P.E.; Somerhalder, B.R. Efficiencies of an Automated Surface Irrigation System with and without a Runoff Reuse System, *Transactions of the ASAE*, 14(4):717-719, 1971.
- Fonken, D.W.; Carmody, T.; Laursen, M.; Fangmeier, D. Mathematical model of border irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, 106(IR3): 203-220, 1980.
- Garrido, M.A.T. Influência do regime de fluxo sobre infiltração e avanço de água em sulcos de irrigação. Lavras, MG, ESAL, Imprensa Universitária, 1992. 92p. (Dissertação de Mestrado).
- Haie, N. Hydrodynamic simulation of continuous and surge surface flow. Ph.D. Dissertation, Agricultural and Irrigation Engineering Department, Utah State University, Logan. Utah. USA. 1984. 147p.
- Hall, W.A. Estimating irrigation border flow. *Agricultural Engineering*, 37(4): 263-265, 1956.
- Hamad, S.D.; Stringham, G.E. Maximum nonerosive furrow irrigation stream size. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, 104(IR3): 275-281, 1978.
- Hart, W.E.; Bassett, D.L.; Strelkoff, T. Surface irrigation hydraulics-kinematics. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, 94 (IR4): 419-440, 1968.
- Henderson, F.M. Open channel flow. New York, Mac Millan Publ. Co., 1966. 552p.
- Henrique, J. Influência dos parâmetros de campo no desempenho do sistema de irrigação por sulcos. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1996. 69p. (Dissertação de Mestrado).
- Henrique, J.; Azevedo, C.A.V.; Barreto, A.N.; Bezerra, J.R.C.; Dantas Neto, J. Variabilidade espacial e temporal na seção transversal de sulcos no perímetro irrigado de São Gonçalo- PB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26. 1997. Campina Grande: SBEA, 1997. CD-Rom
- Katopodes, N.D.; Strelkoff, T. Hydrodynamics of Border Irrigation – Complete Model. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, 103(IR3): 309-324, 1977.
- Kincaid, D.C.; Heermann, D.F.; Kruse, E.G. Hydrodynamics oh border irrigation advance. *Transactions of the ASAE*, 15(4): 674-680, 1972.
- Kruse, E.G.; Heermann, D.F. Implications of Irrigations System Efficiencies. *Journal of Soil and Water Conservation*, 32(6): 465-470. 1977.
- Kruger, W.E.; Bassett, D.L. Unsteady Flow of Water Over a Porous Bed Having Constant Infiltration. *Transactions of the ASAE*, 8(81): 60-62, 1965.
- Lal, R.; Pandya, A.C. Furrow Irrigation with decreasing inflow rate. *Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE*. 96(IR 4): 451-460, 1970.

- Lewis, M.R.; Milne, D.F. Analysis of border irrigation. *Agricultural Engineering*. 19:267-272, 1938.
- Levien, S.L.A. Desenvolvimento de um modelo matemático simplificado da irrigação por sulcos abertos em declive. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 1985. 91p. (Dissertação de Mestrado).
- Levien, S.L.A. Modelo completo de balance de volumen para riego por surcos. Córdoba: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, 1998. 168p. (Tese de Doutorado).
- Levien, S.L.A.; Camacho, E. Simulação da irrigação contínua por sulcos bloqueados ao final usando balanço de volume. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, 2000, Fortaleza, Anais...Fortaleza, CNEA/MA, 2000.
- Levien, S.L.A. Irrigação por superfície: Sistemas de irrigação por superfície. Mossoró-RN, ESAM, 20p. 2003.
- Lima Filho, A.F. Software para avaliação da irrigação por sulcos abertos e em declive. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25. 1996. Bauru, Anais...: Bauru, SBEA, 1996. Resumos. p. 482.
- Marques, P.A.A.; Botrel, T.A. Sulcos 2000: software para dimensionamento de irrigação por sulcos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, 2000, Fortaleza, Anais... Fortaleza, CNEA/MA, 2000.
- Merriam, J.L.; Keller, J. *Farm Irrigation System Evaluation; A Guide for Management*. Utah State University. Logan. Usa. 1978. 271p.
- Olitta, A.F.L. Os métodos de irrigação. 11.ed. São Paulo: Nobel; 1984. 267p.
- Pereira, G.M.; Soares, A.A.; Bernardo, S.; Couto, L.; Gomide, R.L. Estudo das características de avanço e infiltração da água em sulcos, em um latossolo vermelho-escuro alio, com aplicação de água contínua e intermitente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Londrina, Resumos Anais p.389-407, 1991.
- Pérez, C.; Camacho, E.; Roldán, J.; Alcaide, M.; Reza, J.A control system of furrow irrigation in real time. *Phys. Chem. Earth, Great Britain*, v.20, No 3-4, p.351-358, 1995.
- Playán, E.; Faci, J.M. Riego por Superfície. <http://www>. 2001.
- Pordeus, R.V. Estudos de parâmetros para avaliação de irrigação por sulcos abertos em declive utilizando um modelo algébrico. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 1990. 154p. (Dissertação de Mestrado).
- Pordeus, R.V.; Souza, F. de. Estudos de parâmetros para avaliação de irrigação por sulcos abertos em declive utilizando um modelo matemático. *Ciências Agrônômicas*, Fortaleza, v.1, n.1, p.141-154, 1991.
- Pordeus, R.V.; Souza, F. de.; Azevedo, C.A.V. de. Viabilidade da equação do arco da parábola no cálculo do perímetro molhado na irrigação por sulco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.5, n.2, p192-197, 2001.
- Pordeus, R.V.; Azevedo, C.A.V. de.; Souza, F. de; Dantas Neto, J.; Lima, V.L.A. de. Influence of the wetted perimeter estimated by the parable arch equation on infiltration profile in furrow irrigation. 2003 ASAE Annual International Meeting, Las Vegas, NV, USA, paper n. 032243 p.1-10, 2003.

- Pordeus, R.V.; Azevedo, C.A.V. de; Lima, V.L.A. de; Dantas Neto, J. Field evaluation of water infiltration profile in opened and blocked furrow irrigation with continuous flow. 2003 ASAE Annual International Meeting, Las Vegas, NV, USA, paper n. 032244 p.1-12, 2003.
- Press, William. H.; Flannery, Brian P.; Teukolsky, Saul A.; Vetterling, William T. Numerical Recipes in C The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, Cambridge, USA, 994p.1997.
- Purkey, D.R.; Wallender, W.W. Surge flow infiltration variability. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Feb., n. 88-2015. 1989.
- Raghuwanshi, N.; Wallender, W.W. Modeling of seasonal furrow irrigation. Journal of the Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 122(4): 235-242. 1996.
- Rayej, M.; Wallender, W.W. Furrow Irrigation Simulation Time Reduction. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 111(2): 134-146, 1985.
- Reddell, D.L. Modified Rate of Advance Method for an Automatic Furrow Irrigation Systems. Transactions of the ASAE paper No. 81-2552. 1981.
- Reddy, J.M.; Clyma, W. Optimal design of furrow irrigation system. Trans. ASAE, 24(3): 617-623, 1981.
- Renault, D.; Wallender, W.W. Surface storage in furrow irrigation evaluation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Davis, v.123, n.6, 1997a.
- Renault, D.; Wallender, W.W. 1997. Surface storage in furrow irrigation evaluation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE 123(6): 415-422. 1997b.
- Rezende, F.C; Scalco, M.S.; Scaloppi, E.J.; Scardua, R. Alternativas de manejo e dimensionamento em irrigação por sulcos. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 17, 1988, Sorocaba. Anais ... Sorocaba: CNEA/MA, v.1, p.102-114, 1988.
- Rivera, R.C.; Castro, L.C.A. de; Souza, F. de. Variação dos parâmetros de infiltração por sulco ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura do feijão (*Vigna unguiculata* L. Walp). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Viçosa, Resumos SBEA. n.95-3-206, 1995a.
- Rivera, R.C.; Souza, F. de; Teixeira, A. dos S. Simulação da irrigação por sulco utilizando o método do balanço de volume. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Viçosa, Resumos, SBEA n.95-3-301, 1995b.
- Rodriguez, J.A. Determinação de critérios de irrigação superficial utilizando o método do SCS-USDA para o vale do Jaguaribe. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 1989. 183p. (Dissertação de Mestrado).
- Seminário Internacional Sobre Uso Eficiente de Água. www.unesco.org/uy/phi/libros/uso_eficiente/cap1.html. 2001. (acessado julho/2003)
- Sakkas, J.G.; Strelkoff, T. Hydrodynamics of Surface Irrigation. Advance Phase. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, 100(IR1): 31-48, 1974.
- Santana, E.F. Monitoramento sazonal do desempenho de um sistema de irrigação por sulcos no perímetro irrigado de São Gonçalo-PB. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1996. 99p. (Dissertação de Mestrado).

- Santana, E.F.; Azevedo, C.A.V.; Barreto, A.N.; Dantas Neto, J.; Bezerra, J.R.C. Monitoramento sazonal e temporal do perfil geométrico do sulco na cultura do algodoeiro. In: Congresso Brasileiro de Algodão, 1. 1997. Anais... Fortaleza: EMBRAPA, 1997. p.376-379.
- Scaloppi, E.J. Modelos matemáticos para simulação da irrigação superficial. Botucatu, (Livre Docência – Faculdade de Ciências Agrônômicas/UNESP). 1983. 115p
- Scaloppi, E.J. Sistema de irrigação por superfície. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 12, n. 139, p. 12-26. 1986.
- Scaloppi, E.J. Solução temporal do avanço da água em sistemas de irrigação por superfície. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Viçosa, Resumos SBEA n.95-3-223, 1995.
- Scaloppi, E.J. Irrigação por superfície. In: Miranda, J.H.; Pires, R.C.M. (eds). Irrigação – Série Engenharia Agrícola Irrigação. Piracicaba: FUNEP/SBEA, 2003. cap.13, p.311-404.
- Serralheiro, R.P. Modernização e desenvolvimento da rega de superfície. Universidade de Évora, série Ciências Agrárias, n.2. p.235, 1996.
- Shank, B.F. 1996 irrigation survey. Irrigation Journal, v.47, n.1, p.42, 1997.
- Silveira, J.I.; Azevedo, C.A.V. de; Pordeus, R.V.; Lima, V.L.A. de. Comportamento do tempo de oportunidade de infiltração no desempenho do sistema de irrigação por sulcos para diferentes comprimentos de sulcos. In: XXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, 2000, Fortaleza, Anais... Fortaleza, CNEA/MA, 2000a.
- Silveira, J.I.; Azevedo, C.A.V. de; Pordeus, R.V.; Dantas Neto, J. Efeito da lâmina requerida no desempenho da irrigação por sulcos para diferentes tipos de solo. In: XXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, 2000, Fortaleza, Anais...Fortaleza, CNEA/MA, 2000b.
- Silveira, J.I.; Azevedo, C.A.V. de; Pordeus, R.V.; Matos, J.A. Efeito do comprimento de sulcos no tempo de aplicação d'água para diferentes lâminas d'água requerida e tipos de solo. In: XXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, 2001, Foz de Iguaçu, Anais...Foz de Iguaçu: SBEA, 2001a.
- Silveira, J.I.; Azevedo, C.A.V. de; Pordeus, R.V.; Azevedo, H.M. Comportamento das perdas d'água por escoamento associado à lâmina requerida, comprimento de sulco e tipo de solo. In: XXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, 2001, Foz de Iguaçu, Anais...Foz de Iguaçu: SBEA, 2001b.
- Smith, R.C.G.; Mason, W.K.; Meyer; W.S.; Barrs, H.D. Irrigation in Australia: developments and prospects.. In: Advances in Irrigation (Hillel D, ed.), v.2, p.99-155. 1983. New York: Academic Press
- Soares, A.A. Irrigação por Superfície. Brasília. ABEAS, 1992, 72p. (Apostila).
- Souza, F. de. Nonlinear hydrodynamic model of furrow irrigation. Ph. D. Dissertation, Land, Air and Water Resources Department, University of California, Davis, California, USA, 1981. 172p.
- Souza, F. de. Hidráulica da Irrigação por Superfície. Apostila, 1983. 54p.
- Souza, F. de. Modelo matemático da irrigação por sulcos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.19(9), p1135-1143, 1984.

- Sousa, J.R. de; Queiroz, J.E.; Gheyi, H.R. Variabilidade espacial de características físico-hídricas e de água disponível em um solo aluvial no semi-árido paraibano. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.3, n.2, p.140-144, 1999.
- Souza, F. de. Manejo computadorizado da irrigação utilizando o programa "CROPWAT" da FAO: estudo de caso de híbridos de milho (*Zea mays, L.*) no vale do Curu-Ceará. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 1992. 89p. (Dissertação de Tese Docência).
- Souza, F. de. IRRIGAÇÃO, DESENVOLVIMENTO E TECNOLOGIA, Fortaleza: Editora Universitária; 2000. 93p.
- Strelkoff, T. Numerical solution of the Saint-Venant equations. *Journal Hydraulics Division. ASCE*, 96(HY1): 223-252, 1970.
- Strelkoff, T.; Bjorneberg, D.L. Hydraulic Modeling of Irrigation-Induced Furrow Erosion, 10th International Soil Conservation Organization Meeting, Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, In: D.E. Stott, R.H. Mohtar and G.C. Steinhardt (eds). p.699-705, 2001.
- Strelkoff, T.; Katopodes, N.D. End Depth Under Zero-Inertia Conditions. *Journal of the Hydraulics Division. ASCE*, 103(HY1): 699-611, 1977.
- Strelkoff, T. Souza, F. *Modeling effect of depth on furrow infiltration*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE*. 110(4): 375-387. 1984.
- Strelkoff, T. SRFR: A Computer Program for Simulation Flow in Surface Irrigation. Furrows-Basins-Borders. WCL Report #17, U. S. Water Conservation Laboratory, USDA/ARS, Phoenix, Arizona, USA, 75p., 1990.
- Tabuada, M.A. Modelação bidimensional e tridimensional da rega por sulcos. Lisboa, 1989. 237p. (Doutorado - Universidade de Lisboa)
- Valiantzas, J.D. Explicit time of advance formula for furrow desing. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Davis*, v.125, n.1, 1999.
- Vázquez, E. Método simplificado para determinar el gasto óptimo y el tiempo de riego al aplicar riego continuo con surcos cerrados. In: XVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA. Guayaquil, Equador, v.5, p.353-363, 1996a.
- Vázquez, E. Diseño y revisión de surcos con riegos continuos y de corte posterior. *Ingenieria del agua*, Valencia (Espanha), v.3, n.3, p.7-14, 1996b.
- Walker, W.R.; Skogerboe, G.V. *Surface Irrigation: Theory and Practice*. Utah: 1987. 470p.
- Walker, W.R.; Humpherys, A.S. Kinematic-wave furrow irrigation model. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, 109(IR4): 377-392, 1983.
- Walker, W.R. SIRMOD, Surface irrigation simulation software. Utah State University. Logan, Utah, 1989.
- Walker, W.R. Software for Simulation, Design, and Evaluation of Surface Irrigation – User's Guide and Technical Documentation. Biological and Irrigation Engineering, Utah State University, Logan, UT 84322-4105, 2001. 63p.
- Wallender, W.W. Furrow model with spatially varying infiltration. *Transactions of the ASAE*, 29(4): 1012-1016, 1986.

Wallender, W.W.; Junji Yokokura. 1991. Space solution of kinematic-wave model by time iteration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 117(1):140-144.

Wilke, O.C. A hydrodynamic study of flow in irrigation furrows. Technical Report nº13, Water Resources Institute, Texas A&M University, USA. 1968.

Wilke, O.C.; Smerdon, E.T. A hydrodynamic determination of cutback stream sizes for irrigation furrows. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, 12(5): 634-637, 1969.

Wu, I.P.; Liang, T. Optimal desing of furrow length of surface irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage, ASCE*, 96(3): 319-332, 1970.

ANEXO I
LISTA DE SÍMBOLOS

ANEXO I
LISTA DE SÍMBOLOS

Notação

A	Área da seção transversal do escoamento de fluxo, m^2
t	Tempo de ocorrência, segundos
x	Distância ao longo do comprimento do campo, m
τ	Tempo de oportunidade de infiltração em segundo
Z	Volume infiltrado acumulado por unidade de comprimento de sulco, $m^3 m^{-1}$
S_o	Declividade do campo, $m m^{-1}$
S_f	Declividade da linha de energia, $m m^{-1}$
y	Profundidade do fluxo no sulco, m
R	Raio hidráulico, m
$\sigma_1, \sigma_2,$ ρ_1, ρ_2	Parâmetros empíricos que dependem da forma do sulco, adimensional.
Q	Vazão de entrada, $m^3 min^{-1}$
n	Coefficiente de rugosidade de Manning, $m^{-1/3} s$ S_o é declividade média do sulco em $m m^{-1}$
δx_k	k -ésimo incremento de espaço, definido pelo avanço durante o intervalo de tempo quando $i = k$
∂t	Incremento de tempo
∂x	Incremento espacial
θ	Coefficientes de ponderação temporal
ϕ	Coefficientes de ponderação espacial
t_{ap}	Tempo de aplicação
Z	Infiltração acumulada, $m^3 m^{-1} min^{-1}$
τ	Tempo de oportunidade de infiltração, min
k	Coefficiente da equação de infiltração de Kostiakov-Lewis, $m^3 min^{-a} m^{-1}$
a	Coefficientes empíricos da equação de infiltração de Kostiakov-Lewis
f_o	Taxa de infiltração básica, $m^3 m^{-1} min^{-1}$ (equação de infiltração)

Q_{max}	Vazão máxima não erosiva, $m^3 \text{ min}^{-1}$
V_{max}	Velocidade máxima não erosiva, $m \text{ min}^{-1}$
Q_o	Fluxo de entrada por unidade de largura ou por sulco a montante do campo, $m^3 \text{ min}^{-1}$
t_x	Tempo desde o início do fluxo de entrada, em min
σ_y	Fator de forma da superfície de fluxo, definido como uma constante que varia de 0,70 a 0,80
A_o	Área de fluxo à montante do campo para um tempo final t_x , m^2
x	Distância da frente de avanço no tempo t_x , m
σ_z	Fator de forma subsuperficial, descreve a lâmina média infiltrada
r	Expoente da equação potencial do avanço
$t_{.5L}$	Tempo de avanço medido até a metade da área, 0,5L
t_L	Tempo de avanço medido até o final do campo, L
0,5L	Comprimento do sulco medido até a metade da área
L	Comprimento do sulco medido até o final da área
V_z	Volume total infiltrado, m^3
Z_i	Lâmina acumulada para o ponto i, $m^3 \text{ m}^{-1}$
t_r	Tempo de recessão, min
$(t_a)_i$	Tempo de avanço para a i-ésima estação, min
t_{com}	Tempo de corte ou de aplicação do fluxo, min
Z_{req}	Lâmina requerida de irrigação, m
V_{rz}	Volume de água por unidade de largura ou por espaçamento de sulco que é realmente armazenado na zona radicular, m^3
V_{di}	Volume de água por unidade de largura ou por espaçamento de sulco que é representado como uma sub-irrigação. m^3
V_{za}	Volume infiltrado na área adequadamente irrigada, m^3
V_{zi}	Volume infiltrado na área inadequadamente irrigada, m^3
V_{dp}	Volume de água por unidade de largura ou por espaçamento de sulco que percola abaixo da zona radicular, m^3
V_{ro}	Volume de água por unidade de largura ou por espaçamento de sulco que escoou do campo, m^3 .
Z_{min}	Lâmina mínima de infiltração aplicada ao campo, freqüentemente, mas nem

sempre localizada à jusante do campo.

Z_{iq}	Lâmina média de água infiltrada nos 25% da área menos irrigada
x_d	Comprimento do sulco irrigado adequadamente, m
DU	Uniformidade de distribuição, %
DU_a	Uniformidade de distribuição absoluta, %
E_a	Eficiência de aplicação, %
E_r	Eficiência de requerimento de água ou eficiência de armazenamento, %
TE	Taxa de escoamento, %
TP	Taxa de percolação, %

ANEXO II
CÓDIGO FONTE


```
*****
// SASIS Software Aplicado à Simulação de Irrigação por Superfície
// ©copyright 2005 – Reservado todos direitos por Roberto Vieira Pordeus
// e Carlos Alberto Vieira de Azevedo
*****
unit Sasi_SimulaU1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls, ExtCtrls, Buttons, math, ComCtrls, Grids, TeEngine, Series,
  TeeProcs, Chart, DBCtrls, DBGrids, Db, DBTables, Mask, PackTable;

type
  TSasi_Simula = class(TForm)
    PageControl1: TPageControl;
    TabSheet1: TTabSheet;
    TabSheet2: TTabSheet;
    TabSheet3: TTabSheet;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Label19: TLabel;
    Label20: TLabel;
    Label21: TLabel;
    Label25: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label7: TLabel;
    Label8: TLabel;
    Edit1: TEdit;
    Edit2: TEdit;
    Edit3: TEdit;
    Edit4: TEdit;
    Edit5: TEdit;
    Edit9: TEdit;
    Edit10: TEdit;
    Edit11: TEdit;
    Edit14: TEdit;
    Panel1: TPanel;
    SpeedButton3: TSpeedButton;
    SpeedButton4: TSpeedButton;
    SpeedButton1: TSpeedButton;
    SpeedButton6: TSpeedButton;
    Panel2: TPanel;
```

```
Label38: TLabel;  
Label39: TLabel;  
Label40: TLabel;  
Label41: TLabel;  
Label42: TLabel;  
Label43: TLabel;  
Label44: TLabel;  
Label45: TLabel;  
Label46: TLabel;  
Label47: TLabel;  
Edit22: TEdit;  
Edit23: TEdit;  
Edit24: TEdit;  
Edit25: TEdit;  
Edit26: TEdit;  
Edit27: TEdit;  
Edit28: TEdit;  
Edit29: TEdit;  
Edit30: TEdit;  
Edit31: TEdit;  
Memo1: TMemo;  
TabSheet4: TTabSheet;  
Panel3: TPanel;  
SpeedButton11: TSpeedButton;  
SpeedButton14: TSpeedButton;  
SpeedButton7: TSpeedButton;  
SpeedButton2: TSpeedButton;  
Chart1: TChart;  
Series1: TLineSeries;  
SpeedButton5: TSpeedButton;  
SpeedButton8: TSpeedButton;  
Label12: TLabel;  
Panel4: TPanel;  
Label15: TLabel;  
Label16: TLabel;  
Label17: TLabel;  
Label18: TLabel;  
Label22: TLabel;  
Label37: TLabel;  
Label36: TLabel;  
Label30: TLabel;  
Label29: TLabel;  
Label23: TLabel;  
Label24: TLabel;  
Label26: TLabel;  
Label27: TLabel;  
Label28: TLabel;  
Label51: TLabel;  
Label50: TLabel;
```



```
Label49: TLabel;  
Label48: TLabel;  
Series2: TLineSeries;  
DSSasis: TDataSource;  
Sasis: TTable;  
DBGrid1: TDBGrid;  
DBNavigator1: TDBNavigator;  
SasisNO: TFloatField;  
SasisXA: TFloatField;  
SasisTA: TFloatField;  
SasisTR: TFloatField;  
SasisTAU: TFloatField;  
SasisTZ: TFloatField;  
Label4: TLabel;  
Label11: TLabel;  
Label13: TLabel;  
Label14: TLabel;  
Label31: TLabel;  
Edit6: TEdit;  
Label32: TLabel;  
Edit7: TEdit;  
SasisVZ: TFloatField;  
SasisVZAC: TFloatField;  
Label33: TLabel;  
Label34: TLabel;  
SasisLAZR: TFloatField;  
SasisVAZR: TFloatField;  
Series3: TLineSeries;  
Series4: TLineSeries;  
Label35: TLabel;  
Label52: TLabel;  
Panel5: TPanel;  
Shape2: TShape;  
Shape1: TShape;  
Shape3: TShape;  
Shape4: TShape;  
Label53: TLabel;  
Label54: TLabel;  
Label55: TLabel;  
Label56: TLabel;  
ComboBox1: TComboBox;  
ComboBox2: TComboBox;  
ComboBox3: TComboBox;  
Panel6: TPanel;  
Label57: TLabel;  
DSAvanco: TDataSource;  
DBGrid2: TDBGrid;  
DBNavigator2: TDBNavigator;  
Panel7: TPanel;
```

```
SpeedButton9: TSpeedButton;
SpeedButton10: TSpeedButton;
DBEdit1: TDBEdit;
Avanco: TTable;
AvancoNUMERO: TSmallintField;
AvancoMEDIDA: TFloatField;
SpeedButton12: TSpeedButton;
Label58: TLabel;
ComboBox4: TComboBox;
procedure SpeedButton6Click(Sender: TObject);
procedure FormKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit1KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit2KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit3KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit4KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit5KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit6KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit7KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit8KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit9KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit10KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit11KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit12KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit13KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit14KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit15KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit16KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit17KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit18KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit19KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit20KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit21KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit22KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit23KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit24KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit25KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit26KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit27KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit28KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit29KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit30KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure Edit31KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure SpeedButton1Click(Sender: TObject);
procedure FormShow(Sender: TObject);
procedure SpeedButton2Click(Sender: TObject);
procedure SpeedButton5Click(Sender: TObject);
procedure SpeedButton8Click(Sender: TObject);
procedure SpeedButton11Click(Sender: TObject);
procedure SpeedButton14Click(Sender: TObject);
```

```

procedure SpeedButton7Click(Sender: TObject);
procedure PageControl1Change(Sender: TObject);
procedure SpeedButton9Click(Sender: TObject);
procedure SpeedButton10Click(Sender: TObject);
procedure DBEdit1KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
procedure DBGrid2CellClick(Column: TColumn);
procedure SpeedButton12Click(Sender: TObject);
procedure DBNavigator2Click(Sender: TObject; Button: TNavigateBtn);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

*****
// SASIS Software Aplicado à Simulação de Irrigação por Superfície
// ©opyright 2005 – Reservado todos direitos por Roberto Vieira Pordeus
// e Carlos Alberto Vieira de Azevedo
*****

var
  Sasi_Simula: TSasi_Simula;
  //*****
  // SASI variáveis
  //*****
  nome, cc2, cc3, cc1, node, iter, MAXN, us, ds, i,rc, pfe, s : Integer;
  MAXFN : Integer;
  a, GOLD, CGOLD, rough, theta, nep, change, m, dfda, func, surface, tau, m1, alpha,
  qinlet, subsurf, mindx, rexp, rcoe, fieldn : Double;
  zreq, sumtime, ampb, cn3, cn2, cn1, slope, beta, sig1, sig2 : Double;
  newp : array[0..60] of Double;
  fieldx : array[0..60] of Double;
  fieldt : array[0..60] of Double;
  pp : array[0..60] of Double;
  zz : array[0..60] of Double;
  palavra, parte1, parte2 : String;
  ncell, trata, tamanho : Integer;
  dt, vcx, result_cinematica, volta : Double;
  // Vetores
  xtt : array[0..60] of Double;
  tta : array[0..60] of Double;
  tzt : array[0..60] of Double;
  zt : array[0..60] of Double;
  opt : array[0..60] of Double;
  tdx : array[0..60] of Double;
  ttdx : array[0..60] of Double;
  xt : array[0..60] of Double;
  cumz : array[0..60] of Double;

```

```

ap : array[0..60] of Double;
qp : array[0..60] of Double;
zp : array[0..60] of Double;
an : array[0..60] of Double;
qn : array[0..60] of Double;
zn : array[0..60] of Double;
dx : array[0..60] of Double;
tr : array[0..60] of Double;
so : array[0..60] of Double;
ta : array[0..60] of Double;
xa : array[0..60] of Double;
vz : array[0..60] of Double;
vzac : array[0..60] of Double;
dxv : array[0..60] of Double;
dq : array[0..60] of Double;
da : array[0..60] of Double;
roff : array[0..500] of Double;
tov : array[0..5000] of Double;
di, du, dua, ea, er, alf, alp, area1 : Double;
xd : array[0..21] of Double;
zd : array[0..21] of Double;
lazr : array[0..60] of Double;
// Variáveis da função Cinematcia
n : Integer;
ql, qj, qm, al, aj, am, zl, zj, zm, zr, c1, c2, dan, dak : Double;
dxx, ttt, dat : Double;
// Variáveis da função de infiltração
xtz, r1, r2, r3 : Double;
// Variáveis do Procedure CALCULO
top, xcb, xcv, t12, t11, nout, fl : Double;
nroff, errorx, sol, q : Double;
k, zave, zlqr, rootsto : Double;
dxd, zmin : Double;
linx, colx : Integer;
// Variáveis da Função Graf
x, y, irow: Integer;
// Variáveis da Função Plotit
x1, y1, x2, y2, z1, z2, xx1, xx2, yy1, yy2 : Double;
verror : Double;
ntcol, n_hid, n_run : Integer;
gxmax, xaxis, aaxis, gamax, zaxis, gzmax, taxis, gtmax : Integer;
k1, j, ka, ntcol, qaxis, gqmax : Integer;
tcom, fo, qinc, tco, nf : Double;
vinflow, gam2, gam1, del, phi, dtm, rho1, rho2 : Double;
qinn, vinfilt, vroff : Double;
fl : Double; // esta variavel é FL ou FO
ijk : Integer;
graf, laminas, nit : Integer;
chi, chis, schi, tau2, tau1 : Double;

```

```
vdef, te, tp, v25, vescol, vpercol, somavz, ttau1, ttau2, luis1 : Double;
limite : array[0..200] of Double;
registro : Integer;
```

```
implementation
```

```
uses Sasi_ImprimePrvU1, Sasi_StringGridPrvU1, Sasi_GraficoPrvU1;
```

```
{SR *.DFM}
```

```
*****
// SASIS Software Aplicado à Simulação de Irrigação por Superfície
// Copyright 2005 – Reservado todos direitos por Roberto Vieira Pordeus
// e Carlos Alberto Vieira de Azevedo
*****
```

```
/*-----
/*Método de Newton para resolver equação da continuidade
/* para área de fluxo no nó R
/*-----
```

```
Function Newton(node : Integer; cc1, cc2 : Double) : Integer;
```

```
begin
```

```
  iter := 0;
```

```
  while (iter < 10) do
```

```
    begin
```

```
      if (an[node]<0.0000001) then
```

```
        Break;
```

```
      func := Power(an[node],m1)+(cc1*an[node])+cc2;
```

```
      dfda := m1 * Power(an[node],m)+cc1;
```

```
      if (Abs(dfda) < 0.000001) then
```

```
        Break;
```

```
      change := func/dfda;
```

```
      an[node]:= an[node] - change;
```

```
      if (Abs(change) < 0.00001) then
```

```
        Result := 1;
```

```
      iter := iter + 1;
```

```
    end;
```

```
/*-----
```

```
/*Não Converge
```

```
/*-----
```

```
Result := 0;
```

```
end;
```



```
*****
// SASIS Software Aplicado à Simulação de Irrigação por Superfície
// ©copyright 2005 – Reservado todos direitos por Roberto Vieira Pordeus
// e Carlos Alberto Vieira de Azevedo
*****

//*****
// Chamada da Função de Conversão: Caracter para Numérico ***
//*****

Function Edita(Palavra : String) : Double;
begin
  parte1 := "";
  parte2 := "";
  tamanho := 0;
  tamanho := Length(palavra);
  for i := 1 to tamanho do
    if (Copy(palavra,i,1) = '.') then
      begin
        j := i - 1;
        k1 := i + 1;
        parte1 := Copy(palavra,1,j);
        parte2 := Copy(palavra,k1,(tamanho-(j + 1)));
        Break;
      end;
  tamanho := Length(parte2);
  if (tamanho > 0) then
    begin
      if (tamanho = 1) then
        trata := 10
      else if (tamanho = 2) then
        trata := 100
      else if (tamanho = 3) then
        trata := 1000
      else if (tamanho = 4) then
        trata := 10000
      else if (tamanho = 5) then
        trata := 100000
      else if (tamanho = 6) then
        trata := 1000000
      else if (tamanho = 7) then
        trata := 10000000
      else if (tamanho = 8) then
        trata := 100000000
      else if (tamanho = 9) then
        trata := 1000000000;
      //else if (tamanho = 10) then
      //  trata := 10000000000;
      palavra := parte1 + parte2;
```

```
        volta := StrToFloat(palavra)/trata;
    end
else
    volta := StrToInt(palavra);
    Result := volta;
end;
```

```
{*****
*** Fim da Função de Conversão ***
*****}
```

```
*****
// SASIS Software Aplicado à Simulação de Irrigação por Superfície
// ©copyright 2005 – Reservado todos direitos por Roberto Vieira Pordeus
// e Carlos Alberto Vieira de Azevedo
*****
```

```
procedure TSasi_Simula.SpeedButton6Click(Sender: TObject);
```

```
begin
    if (Sasis.RecordCount > 0) then
        begin
            Sasis.Close;
            Sasis.EmptyTable;
        end;
        Avanco.Close;
        Close;
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.FormKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
```

```
begin
    if (Key = #13) then
        SelectNext(ActiveControl, True, True);
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit1KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
```

```
begin
    if (Key = ',') then
        Key := '!';
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit2KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
```

```
begin
    if (Key = ',') then
        Key := '!';
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit3KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
```

```
begin
```

```
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit4KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit5KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit6KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit7KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit8KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit9KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit10KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit11KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then
```

```
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit12KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit13KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit14KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit15KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit16KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit17KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit18KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit19KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
    if (Key = ',') then  
        Key := '!';  
end;
```

```
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit20KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit21KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit22KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit23KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit24KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit25KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit26KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit27KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if (Key = ',') then  
    Key := '!';  
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit28KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
  if (Key = ',') then
    Key := '!';
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit29KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
  if (Key = ',') then
    Key := '!';
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit30KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
  if (Key = ',') then
    Key := '!';
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.Edit31KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
  if (Key = ',') then
    Key := '!';
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.SpeedButton1Click(Sender: TObject);
begin
  somavz := 0.00;
  if (Sasis.RecordCount > 0) then
    begin
      Sasis.Close;
      Sasis.EmptyTable;
      Sasis.Open;
    end;
  nep := 2.71828182845904523536028747135266;
  //
  linx := 3;
  n_hid := 0; n_run := 0;
  Chart1.Title.Text.Clear;
  Chart1.Title.Text.Add('Perfis: Superficial e Subsuperficial');
  // qinlps = Fluxo de Entrada
  trata := 0;
  palavra := "";
  palavra := Edit1.Text;
  qinlet := Edita(palavra);
  // rough = "n" de MANNING
  trata := 0;
  palavra := "";
  palavra := Edit2.Text;
```

```
rough := Edita(palavra);
// k - parâmetro de Kostiakov-Lewis
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit3.Text;
k := Edita(palavra);
// a - expoente da equação de infiltração de Kostiakov-Lewis
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit4.Text;
a := Edita(palavra);
// fo =
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit5.Text;
fo := Edita(palavra);
// zreq = lâmina requerida
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit6.Text;
zreq := Edita(palavra);
// di = distância entre sulcos
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit7.Text;
di := Edita(palavra);
// fieldn = comprimento do campo
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit9.Text;
fieldn := Edita(palavra);
// tcom = tempo de corte em minutos
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit10.Text;
tcom := Edita(palavra);
// slope = Declividade 1 do campo
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit11.Text;
slope := Edita(palavra);
// dt = Intervalo de tempo
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit14.Text;
dt := Edita(palavra);
// rho1 = Rho1 parâmetro linear da equação da continuidade
trata := 0;
palavra := "";
```

```
palavra := Edit22.Text;
rho1 := Edita(palavra);
// rho2 = Rho2 parâmetro exponencial da equação da continuidade
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit23.Text;
rho2 := Edita(palavra);
// dtm = dtm variação do tempo computacional
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit24.Text;
dtm := Edita(palavra);
// phi = fator de ponderação espacial
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit25.Text;
phi := Edita(palavra);
// teta = fator de ponderação espacial
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit26.Text;
theta := Edita(palavra);
// del = del fator de ponderação temporal
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit27.Text;
del := Edita(palavra);
// gam1 = gama1 parâmetro linear da equação do perímetro molhado
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit28.Text;
gam1 := Edita(palavra);
// gama2 = gama2 parâmetro exponencial da equação do perímetro molhado
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit29.Text;
gam2 := Edita(palavra);
// Sigma1 = parâmetro linear da equação da área
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit30.Text;
sig1 := Edita(palavra);
// Sigma2 = parâmetro exponencial da equação da área
trata := 0;
palavra := "";
palavra := Edit31.Text;
sig2 := Edita(palavra);
```



```

*****
// SASIS Software Aplicado à Simulação de Irrigação por Superfície
// ©Copyright 2005 – Reservado todos direitos por Roberto Vieira Pordus
// e Carlos Alberto Vieira de Azevedo
*****
//
// Este é o main do modelo de simulação hidráulico,
//
// Software Aplicado à Simulação de Irrigação por Superfície
//
//
*****
MAXN := 500;
MAXFN := 50;
GOLD := 1.618034;
CGOLD := 0.381966;
Series1.Clear;
Series2.Clear;
// Inicializações de Powell - que não têm dem Kinematic
rough := 0.02;
rho1 := 0.532;
rho2 := 2.840;
sig1 := 1.61894;
sig2 := 1.76998;
beta := 1.0/(sig2+rho2-2.0);
surface := 1.0/(1.0 + beta);
//dt := dt * 120;
phi := 0.65;
theta := 0.65;
slope := 0.0025;
alpha := SQR(rho1 * slope/rough);
m1 := rho2/2.0;
m := m1 - 1.0;
cn1 := phi/(theta * alpha);
cn2 := (1.0 - phi)/(theta * alpha * dt);
cn3 := (1.0 - theta)/theta;
//-----
// Constantes de Ondas Cinemáticas
//-----
//midx := 0.01*fidx[Round(fieldn)];
rootsto := 0;
vdef := 0.00;
midx := 0.01 * fieldn;
vz[0] := 0.00;
vzac[0] := 0.00;
ta[0] := 0.00;
xa[0] := 0.0;
dx[0] := 0.0;
zz[0] := 0.00;

```

```

tr[0] := tcom;
tau := tr[0] - ta[0];
//-----
// Setup para Ondas Cinemáticas
//-----
us := 1;
ds := 1;           //Inicialização de Nó
ta[1] := dt;       // Incremento do tempo inicial (sec)
subsurf := 1.0/(1.0+a); // a - Fator de forma subsuperficial
// chamada de função SOLN
//-----
// Acima conjunto de solução para calcular o avanço inicial.
//-----
//-----
// Limite de Montante
//-----
an[0] := qinlet/alpha;
an[0] := Power(an[0],1.0/m1);
ap[0] := an[0];
//-----
// Avanço Inicial
//-----
tau := tr[0] - ta[0];
zz[1] := (k*Power(tau,a))+(fo*tau);
tr[1] := tcom;
dx[1] := (dt*alpha*Power(an[0],m1))/(((surface*an[0])+(subsurf*zz[1])));
xa[1] := dx[1];
vz[1] := ((xa[1]-xa[0])*(zz[1]+zz[0])*di)/2;
vzac[1] := vz[1];
//-----
// Fase de Avanço
//-----
while (xa[ds] <= fieldn) do
  begin
    ds := ds + 1;
    if (ds >= (MAXN-3)) then
      begin
        ds := ds-1;
        Break;
      end;
    ta[ds] := dt*ds;
    tr[ds] := tcom;
    tau := tr[ds] - ta[ds];
    //tr[ds] := tau;
    zz[ds] := (k*Power(tau,a))+(fo*tau);
    //tcom := ((dt*ds)/60) + tau;
    //-----
    // Célula Inicial
    //-----

```

```

i := us;
while (i < (ds-1)) do
  begin
    if (an[i-1] < 0) then
      an[i-1] := an[i-1]*(-1);
    c1 := cn2*dx[i];
    c2 := cn1*(an[i-1]+zz[(ds+1)-i]-ap[i-1]-zz[ds-i]);
    c2 := dx[i]*(c2/(dt+(cn2*(zz[ds-i] - ap[i] - zz[(ds-i)-1]))));
    luis1 := (Power(an[i-1],m1));
    luis1 := luis1 + (cn3*(Power(ap[i],m1)));
    luis1 := luis1 - (Power(ap[i-1],m1));
    c2 := c2- luis1;
    if (an[i-1] < 0.00000001) then
      begin
        ds := ds-1;
        Break;
      end;
    an[i] := ap[i-1];
    rc := Newton(i,c1,c2);
    if (rc <> 0.00) then
      begin
        ds := ds-1;
        Break;
      end;
    i := i + 1;
  end;
//-----
// Penúltima Célula
//-----
c1 := cn2*dx[ds-1];
c2 := phi*(an[ds-2]+zz[2])-(surface*ap[ds-2])-(subsurf*zz[1]);
c2 := (dx[ds-1]*(c2+(1.0-phi)*zz[1]))/(alpha*theta*dt);
if (an[ds-2] < 0) then
  an[ds-2] := an[ds-2]*(-1);
c2 := c2-(Power(an[ds-2],m1))-(cn3*Power(ap[ds-2],m1));
an[ds-1] := ap[ds-2];
rc := Newton((ds-1), c1, c2);
if (rc <> 0.00) then
  begin
    ds := ds - 1;
    Break;
  end;
//-----
// Célula Ponta
//-----
i := 1;
while (i < ds) do
  begin
    ap[i] := an[i];

```

```

    i := i + 1;
  end;
  dx[ds] := dt*alpha*Power(an[ds-1],m1);
  dx[ds] := dx[ds]/((surface*an[ds-1])+(subsurf*zz[1]));
  //-----
  // Avançando muito lento ?
  //-----
  if (dx[ds] < mindx) and (ds > 2) then
    begin
      //-----
      // Extrapolar para o fim do campo
      // e estimar o tempo final
      //-----
      rexp := LogN(nep, xa[ds-2]/xa[ds-1]);
      rexp := rexp/LogN(nep, (ds-2)/(ds-1));
      //rexp := rexp/LogN(nep, ((double)(ds-2)/(double)(ds-1)));
      rcoe := fieldx[Round(fieldn)]*Power(((ds-2)*dt),rexp);
      //rcoe := fieldx[fieldn]*Power(((double)(ds-2)*dt),rexp);
      rcoe := Power(rcoe/xa[ds-1],1.0/rexp);
      if (rcoe > 10.0*fieldt[Round(fieldn)]) then
        begin
          ds := ds-1;
          Break;
        end;
      end;
      xa[ds] := xa[ds-1]+dx[ds];
      vz[ds] := ((xa[ds]-xa[ds-1])*(zz[ds]+zz[ds-1])*di)/2;
      if (zz[ds] >= zreq) then
        rootsto := rootsto + ((xa[ds]-xa[ds-1])*(zreq*di))
      else
        begin
          rootsto := rootsto + ((xa[ds]-xa[ds-1])*(zz[ds]+zz[ds-1])*di)/2;
          //vdef := vdef + ((xa[ds]-xa[ds-1])*(zz[ds]+zz[ds-1])*di)/2;
        end;
      end;
      vdef := rootsto - vdef;
      //-----
      // Interpole para o tempo final
      //-----
      if (dx[ds] = 0) then
        dx[ds] := 1;
        ta[ds] := dt*ds;
        xa[ds] := fieldn;
        // Montar a Saida - Impressão
        somavz := 0;
        linx := 3;
        colx := 1;
        kl := 1;
        linx := 3;

```

```

while (k1 <= ds) do
  begin
    Sasis.Insert;
    Sasis.Edit;
    SasisNO.Value := k1;
    SasisXA.Value := xa[k1];
    SasisTA.Value := ta[k1];
    SasisTR.Value := tcom;
    SasisTAU.Value := SasisTR.Value - SasisTA.Value;
    SasisTZ.Value := zz[k1];
    SasisVZ.Value := vz[k1];
    somavz := somavz + vz[k1];
    SasisVZAC.Value := somavz;
    SasisLAZR.Value := SasisTZ.Value - zreq;
    lazr[k1] := zz[k1] - zreq;
    //SasisVAZR.Value :=
    Sasis.Post;
    linx := linx + 1;
    k1 := k1 + 1;
  end;
/* 2.0 Perfis Gerado no Avanço-Recessão */
/* 3.0 Balanço de Volume Gerado*/
//
// Eficiência de Irrigação
//
xd[0] := 0.0;
i := 1;
while (i <= ds) do
  begin
    xd[i] := xd[i-1] + (fieldn/ds);
    i := i + 1;
  end;
j := 0;
while (j <= ds) do
  begin
    tzt[j] := zz[ds-j];
    j := j + 1;
  end;
zave := 0.0;
zlqr := 0.0;
// rootsto := 0.0;
xd[ds] := fieldn;
j := 0;
i := 1;
while (i < ds) do
  begin
    while ((xd[j] <= xa[i+1]) and (j <= ds)) do
      begin
        zd[j] := tzt[i] + (((xd[j] - xa[i]) * (tzt[i+1] - tzt[i])) / (xa[i+1] - xa[i]));

```

```

        j := j + 1;
    end;
    i := i + 1;
end;
if (tzt[0] <= tzt[ds-1]) then
    zmin := tzt[0]
else
    zmin := tzt[ds];
v25 := (ds * 25.0)/100.0;
laminas := Round(v25);
if (v25 > laminas) then
    v25 := Round(v25) + 1;
zmin := zz[ds];
i := 0;
while (i <= ds) do
    begin
        zave := zave + zz[i];
        if (i >= (ds - v25)) then
            zlqr := zlqr + zz[i];
            i := i + 1;
        end;
    end;
zave := zave/ds;
zlqr := zlqr/v25;
i := 0;
//while (i <= (ds-1)) do
// begin
//     if (zd[i] >= zreq) and (zd[i+1] >= zreq) then
//         //rootsto := rootsto + (zreq*fieldn/20);
//         rootsto := rootsto + (zreq*(fieldn/ds));
//     if (zd[i] < zreq) and (zd[i+1] < zreq) then
//         //rootsto := rootsto + (zreq*fieldn/40);
//         rootsto := rootsto + (((zd[i]+zd[i+1])*fieldn)/(2*ds));
//     if (zd[i] >= zreq) and (zd[i+1] <= zreq) then
//         begin
//             //dxd := (fieldn * (zd[i]-zreq))/((zd[i]- zd[i+1])/20.0);
//             dxd := ((fieldn*(zd[i]-zreq))/(zd[i]-zd[i+1]))*ds;
//             rootsto := rootsto + (zreq*dxd) + ((fieldn/ds)-dxd)*((zreq+zd[i+1])/2.0);
//         end;
//         i := i + 1;
//     end;
//if (zd[i] <= zreq) and (zd[i+1] >= zreq) then
// begin
//     //dxd := fieldn*(zd[i+1]-zreq)/(zd[i+1]-zd[i])/20.;
//     dxd := ((fieldn*(zd[i+1]-zreq))/(zd[i+1]-zd[i]))*ds;
//     rootsto := rootsto + (zreq*dxd) + ((fieldn/ds)-dxd)*((zreq+zd[i+1])/2.0);
// end;
//
// chamada da função do tau_req
//

```

```

ttau1 := 0;
ttau1 := 100.0;
nit := 0;
//while (nit<40) do
while (nit<(2*ds)) do
  begin
    ttau2 := zreq - (k*Power(ttau1,a)-(fo*ttau1));
    ttau2 := tau2/((a*k)/(Power(ttau1,1-a))+fo);
    ttau2 := ttau1 + ttau2;
    if (Abs(ttau2-ttau1) < 0.01) then
      Break
    else
      ttau1 := ttau2;
      nit := nit + 1;
    end;
  //
  vdef := (zreq * di * fieldn) - rootsto;
  tcom := (ta[ds]/60.0)+ttau2;
  qinn := (qinlet*tcom*60)/1000;
  ea := (rootsto/qinn)*100.0;
  if (ea > 100.0) then
    ea := 100.;
  er := (rootsto/(zreq*fieldn))*100.0;
  if (er > 100.0) then
    er := 100.;
  du := zlqr/zave*100.;
  if (du >= 100.0) then
    du := 100.;
  dua := zmin/zave*100.;
  if (dua >= 100.0) then
    dua := 100.;
  //
  // Fim da Eficiência de Irrigação
  //
  vescol := qinn - somavz;
  vpercol := somavz - rootsto;
  te := (vescol/qinn)*100;
  tp := 100 - te - ea;
  Label29.Caption := FormatFloat('0.####', qinn);
  Label30.Caption := FormatFloat('0.####', somavz);
  Label36.Caption := FormatFloat('0.####', vescol);
  Label37.Caption := FormatFloat('0.####', vpercol);
  Label34.Caption := FormatFloat('0.####', rootsto);
  Label52.Caption := FormatFloat('0.####', vdef);
  Label48.Caption := FormatFloat('0.####', ea);
  Label49.Caption := FormatFloat('0.####', er);
  Label50.Caption := FormatFloat('0.####', du);
  Label51.Caption := FormatFloat('0.####', dua);
  Label11.Caption := FormatFloat('0.####', te);

```

```
Label14.Caption := FormatFloat('0.#####', tp);
//
// Fim da Montagem da Saída
//
PageControl1.ActivePage := TabSheet2;
end;

procedure TSasi_Simula.FormShow(Sender: TObject);
begin
  registro := 1;
  graf := 0;
  i := 1;
  Avanco.Open;
  i := 0;
  Avanco.First;
  while not Avanco.Eof do
    begin
      limite[i] := AvancoMEDIDA.Value;
      i := i + 1;
      Avanco.Next;
    end;
  Avanco.Close;
  Avanco.EmptyTable;
  Avanco.Open;
  for j := 0 to i do
    begin
      Avanco.Insert;
      Avanco.Edit;
      AvancoNUMERO.Value := j + 1;
      AvancoMEDIDA.Value := limite[j];
      Avanco.Post;
    end;
  Sasis.Open;
  if (Sasis.RecordCount > 0) then
    begin
      Sasis.Close;
      Sasis.EmptyTable;
      Sasis.Open;
    end;
  linx := 0;
  colx := 0;
  // Preparação das String Grid
  nf := 0;
  Edit1.Text := '1.29'; //valor anterior
  Edit2.Text := '0.013';
  Edit3.Text := '0.01725';
  Edit4.Text := '0.1770';
  Edit5.Text := '0.000039';
  Edit9.Text := '90.0';
```



```
Edit7.Text := '1.0';
Edit10.Text := '100.0';
Edit11.Text := '0.0050';
Edit14.Text := '5.0';
Edit22.Text := '0.321'; // ro1
Edit23.Text := '2.714'; // ro2
Edit24.Text := '1.50';
Edit25.Text := '0.60';
Edit26.Text := '0.65';
Edit27.Text := '12.50';
Edit28.Text := '1.60569';
Edit29.Text := '0.37001';
Edit30.Text := '0.562';
Edit31.Text := '1.455';
// Formato de apresentação dos dados
(Sasis.FieldByName('NO') As TFloatField).DisplayFormat := '#';
(Sasis.FieldByName('XA') As TFloatField).DisplayFormat := '#0.0000';
(Sasis.FieldByName('TA') As TFloatField).DisplayFormat := '#0.0000';
(Sasis.FieldByName('TR') As TFloatField).DisplayFormat := '#0.00';
(Sasis.FieldByName('TAU') As TFloatField).DisplayFormat := '#0.00';
(Sasis.FieldByName('TZ') As TFloatField).DisplayFormat := '#0.0000';
(Sasis.FieldByName('VZ') As TFloatField).DisplayFormat := '#0.0000';
(Sasis.FieldByName('VZAC') As TFloatField).DisplayFormat := '#0.0000';
(Sasis.FieldByName('LAZR') As TFloatField).DisplayFormat := '#0.0000';
(Avanco.FieldByName('MEDIDA') As TFloatField).DisplayFormat := '#0.0';
PageControl1.ActivePage := TabSheet1;
SpeedButton1.Click;
end;

procedure TSasi_Simula.SpeedButton2Click(Sender: TObject);
begin
  if (Sasis.RecordCount > 0) then
    begin
      Sasis.Close;
      Sasis.EmptyTable;
    end;
  Avanco.Close;
  Close;
end;

procedure TSasi_Simula.SpeedButton5Click(Sender: TObject);
begin
  graf := 1;
  ComboBox1.Clear;
  ComboBox2.Clear;
  ComboBox3.Clear;
  ComboBox1.Visible := False;
  ComboBox2.Visible := False;
  ComboBox3.Visible := False;
```

```
Shape1.Visible := False;
Shape2.Visible := False;
Shape3.Visible := False;
Shape4.Visible := False;
Label53.Visible := False;
Label54.Visible := False;
Label55.Visible := False;
Label56.Visible := False;
Series1.Clear;
Series2.Clear;
Series3.Clear;
Series4.Clear;
Chart1.Title.Text.Clear;
Chart1.Title.Text.Add('Distribuição do Avanço: Distância e Tempo');
Chart1.LeftAxis.Title.Font.Style := [];
Chart1.LeftAxis.Title.Font.Size := 12;
Chart1.LeftAxis.Title.Font.Color := clBlue;
Chart1.LeftAxis.Title.Caption := 'Distância e Tempo';
Chart1.BottomAxis.Title.Font.Style := [];
Chart1.BottomAxis.Title.Font.Size := 12;
Chart1.BottomAxis.Title.Font.Color := clBlue;
Chart1.BottomAxis.Title.Caption := 'Nó';
Chart1.LeftAxis.Maximum := xa[ds] + 10;
Chart1.LeftAxis.Minimum := -50;
Chart1.TopAxis.Minimum := -50;
Chart1.BottomAxis.Maximum := ds + 5;
Series1.Clear;
Series2.Clear;
Series3.Clear;
Series4.Clear;
ComboBox1.Clear;
ComboBox1.Visible := True;
ComboBox2.Clear;
ComboBox2.Visible := True;
ComboBox3.Visible := True;
ComboBox1.Font.Color := clBlue;
ComboBox2.Font.Color := clNavy;
ComboBox3.Font.Color := clMaroon;
ComboBox1.Text := '(x , y)';
ComboBox2.Text := '(x , y)';
ComboBox3.Text := '(x , y)';
// ta - montagem do gráfico do tempo
// xa - montagem do gráfico da distância
Avanco.First;
for i := 1 to ds do
  begin
    Series1.AddXY(i, xa[i], ", clBlue);
    Series2.AddXY(i, ta[i], ", clNavy);
    Series3.AddXY(i, AvancoMEDIDA.Value, ", clMaroon);
```

```

        ComboBox1.Items.Add('+FormatFloat('##',i)+' , '+FormatFloat('#.####', xa[i])+');
        ComboBox2.Items.Add('+FormatFloat('##',i)+' , '+FormatFloat('#.####', ta[i])+');
        ComboBox3.Items.Add('+FormatFloat('##',i)+' , '+FormatFloat('#.####',
AvancoMEDIDA.Value)+'');
        if not Avanco.Eof then
            Avanco.Next;
        end;
        Shape1.Visible := True;
        Shape2.Visible := True;
        Shape3.Visible := True;
        Label53.Visible := True;
        Label54.Visible := True;
        Label55.Visible := True;
        Shape1.Brush.Color := clBlue;
        Shape2.Brush.Color := clNavy;
        Shape3.Brush.Color := clMaroon;
        Label53.Font.Color := clBlue;
        Label54.Font.Color := clNavy;
        Label55.Font.Color := clMaroon;
        Label53.Caption := 'Avanço';
        Label54.Caption := 'Tempo';
        Label55.Caption := 'Avanço Real';
end;

```

```

procedure TSasi_Simula.SpeedButton8Click(Sender: TObject);
begin
    graf := 2;
    ComboBox1.Clear;
    ComboBox2.Clear;
    ComboBox3.Clear;
    ComboBox1.Visible := False;
    ComboBox2.Visible := False;
    ComboBox3.Visible := False;
    Shape1.Visible := False;
    Shape2.Visible := False;
    Label53.Visible := False;
    Label54.Visible := False;
    Series1.Clear;
    Series2.Clear;
    Series3.Clear;
    Chart1.Title.Text.Clear;
    Chart1.Title.Text.Add('Perfil de Infiltração');
    Chart1.LeftAxis.Title.Font.Style := [];
    Chart1.LeftAxis.Title.Font.Size := 12;
    Chart1.LeftAxis.Title.Font.Color := clBlue;
    Chart1.LeftAxis.Title.Caption := 'Lâmina Infiltrada (mm)';
    Chart1.BottomAxis.Title.Font.Style := [];
    Chart1.BottomAxis.Title.Font.Size := 12;
    Chart1.BottomAxis.Title.Font.Color := clBlue;

```

```

Chart1.TopAxis.Title.Font.Style := [];
Chart1.TopAxis.Title.Font.Size := 12;
Chart1.TopAxis.Title.Font.Color := clBlue;
Chart1.TopAxis.Title.Caption := 'Comprimento (m)';
Chart1.LeftAxis.Minimum := -50;
Chart1.LeftAxis.Maximum := 0;
ComboBox1.Clear;
ComboBox1.Visible := True;
ComboBox2.Clear;
ComboBox2.Visible := True;
ComboBox3.Clear;
ComboBox3.Visible := True;
ComboBox1.Font.Color := clBlack;
ComboBox2.Font.Color := clGreen;
ComboBox3.Font.Color := clRed;
ComboBox1.Text := '(x , y)';
ComboBox2.Text := '(x , y)';
ComboBox3.Text := '(x , y)';
for i := 1 to ds do
begin
  if (i = 0) then
    Series2.AddXY(i, (zreq*(-1000))+(zz[i]*(-1000)), ", clRed)
  else
    Series2.AddXY(i, (zz[i]*(-1000)), ", clRed);
    Series3.AddXY(i, zreq*(-1000), " clBlack);
    Series4.AddXY(i, laZR[i], ", clGreen);
    ComboBox1.Items.Add('(' + FormatFloat('###, i) + ', '+FormatFloat('0.####', (zreq*(-1000)))) + ')');
    ComboBox2.Items.Add('(' + FormatFloat('###, i) + ', '+FormatFloat('0.####', (zz[i]*(-1000)))) + ')');
    ComboBox3.Items.Add('(' + FormatFloat('###, i) + ', '+FormatFloat('0.####', laZR[i])) + ')');
  end;
  // Pintar zona da área de Raiz
  //for i := 0 to ds do
  //  limite[i] := Round(zz[i]);
  //for i := 0 downto limite[ds] do
  //  for j := 0 to ds do
  //    Series1.AddXY(i, laZR[j], ", clGreen);
  //
Shape1.Visible := True;
Shape2.Visible := True;
Shape3.Visible := True;
Label53.Visible := True;
Label54.Visible := True;
Label55.Visible := True;
Shape1.Brush.Color := clBlack;
Shape2.Brush.Color := clGreen;
Shape3.Brush.Color := clRed;

```

```
Label53.Font.Color := clBlack;
Label54.Font.Color := clGreen;
Label55.Font.Color := clRed;
Label53.Caption := 'Z-Req.';
Label54.Caption := 'Lâmina Infiltrada';
Label55.Caption := 'Percolado';
end;

procedure TSasi_Simula.SpeedButton11Click(Sender: TObject);
begin
  Sasis.First;
  try
    Sasi_ImprimePrv.Sasi_ImprimeQR1.Preview;
  except
    on EAccessViolation do
      begin
        Application.CreateForm(TSasi_ImprimePrv, Sasi_ImprimePrv);
        Sasi_ImprimePrv.Sasi_ImprimeQR1.Preview;
      end;
    end;
  Sasis.First;
end;

procedure TSasi_Simula.SpeedButton14Click(Sender: TObject);
begin
  if (Sasis.RecordCount > 0) then
    begin
      Sasis.Close;
      Sasis.EmptyTable;
    end;
  Avanco.Close;
  Close;
end;

procedure TSasi_Simula.SpeedButton7Click(Sender: TObject);
begin
  Avanco.First;
  try
    Sasi_GraficoPrv.Sasi_GraficoQR1.Preview;
  except
    on EAccessViolation do
      begin
        Application.CreateForm(TSasi_GraficoPrv, Sasi_GraficoPrv);
        Sasi_GraficoPrv.Sasi_GraficoQR1.Preview;
      end;
    end;
  end;
end;

procedure TSasi_Simula.PageControl1Change(Sender: TObject);
```

```
begin
  if (PageControl1.ActivePage = TabSheet3) then
    begin
      Shape1.Visible := False;
      Shape2.Visible := False;
      Shape3.Visible := False;
      Shape4.Visible := False;
      Label53.Visible := False;
      Label54.Visible := False;
      Label55.Visible := False;
      Label56.Visible := False;
    end;
end;

procedure TSasi_Simula.SpeedButton9Click(Sender: TObject);
begin
  try
    Avanco.Insert;
  except
    on EAccessViolation do Avanco.Insert;
  end;
  DBEdit1.SetFocus;
end;

procedure TSasi_Simula.SpeedButton10Click(Sender: TObject);
begin
  if (registro > 0) then
    if (MessageDlg('Quer mesmo EXCLUIR esta Distância: [
'+FloatToStr(AvancoMEDIDA.Value)+' ] ??? >>', mtConfirmation, [mbYes, mbNo], 0) =
mrYes) then
      begin
        i := 1;
        Avanco.First;
        while not Avanco.Eof do
          begin
            if (i <> registro) then
              begin
                limite[i] := AvancoMEDIDA.Value;
                ComboBox4.Items.Add(FloatToStr(limite[j]));
                i := i + 1;
              end
            else
              i := i + 1;
            Avanco.Next;
          end;
        {Avanco.Close;
        Avanco.EmptyTable;
        Avanco.Open;
        for j := 1 to i do
```

```
        begin
            Avanco.Insert;
            Avanco.Edit;
            AvancoNUMERO.Value := j;
            AvancoMEDIDA.Value := limite[j];
            Avanco.Post;
            ComboBox4.Items.Add(FloatToStr(limite[j]));
        end;}
    end
else
    ShowMessage('Não Existe medida na base.');
```

```
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.DBEdit1KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
    if (Key = ',') then
        Key := '!';
    if (Key = #13) then
        begin
            Avanco.Edit;
            Avanco.Post;
        end;
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.DBGrid2CellClick(Column: TColumn);
begin
    DBEdit1.SetFocus;
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.SpeedButton12Click(Sender: TObject);
begin
    if (MessageDlg('Quer mesmo EXCLUIR Todas as DISTÂNCIAS??? >>',
mtConfirmation, [mbYes, mbNo], 0) = mrYes) then
        begin
            Avanco.Close;
            Avanco.EmptyTable;
            Avanco.Open;
        end;
end;
```

```
procedure TSasi_Simula.DBNavigator2Click(Sender: TObject;
Button: TNavigateBtn);
begin
    registro := Avanco.RecNo;
    Label58.Caption := IntToStr(registro);
end;
```

```
end.
```

ANEXO III
SIMULAÇÃO SASIS

Nome do Experimento: **PISG1**

Irrigação Superficial - Modelo de Roberto V. Pordeus

Balço de Volume

Fluxo Total de Entrada.....:	7,182
Vol. Total Infiltrado.....:	6,018615
Volume Escoado.....:	1,163385
Volume Percolado.....:	0,435037
Vol. Armaz. na Zona de Raiz:	5,583578
Vol. de Déficit.....:	0,446422

Análise de Eficiência-Uniformidade

Efic. de Aplicação.....:	77,744054
Efic. de Armazenamento:	92,59665
Unif. de Distribuição.....:	100,0
Unif. de Dist. Absoluta...:	92,615728
Tx. de Escoamento.....:	16,198615
Tx. Percolada.....:	6,05733

Trajétória de Avanço/Recessão e Perfil de Infiltração

Nó	XA (m)	TA (min)	TR (min)	Tau (m ³ m. ⁻¹)	TZ (m ³ m. ⁻¹)	VZ (m ³ m. ⁻¹)	VZAC (m ³ m. ⁻¹)	LAZRC (m ³ m. ⁻¹)
1	9,0	5,0	90,0	85,0	0,0931	0,4205	0,4205	0,0031
2	18,1	10,0	90,0	80,0	0,0901	0,8319	1,2525	0,0001
3	27,3	15,0	90,0	75,0	0,0885	0,8190	2,0715	-0,0015
4	36,5	20,0	90,0	70,0	0,0869	0,8097	2,8812	-0,0031
5	45,8	25,0	90,0	65,0	0,0852	0,8003	3,6815	-0,0048
6	55,2	30,0	90,0	60,0	0,0834	0,7903	4,4717	-0,0066
7	64,6	35,0	90,0	55,0	0,0816	0,7793	5,2511	-0,0084
8	67,0	40,0	90,0	50,0	0,0797	0,7675	6,0186	-0,0103

Dados de Entrada:

1.) Fluxo de Entrada --- (L m. ⁻¹).....:	1,33	RHO 1.....:	0,291	
2.) "n" de Manning --- (0,02 - 0,15).....:	0,02	RHO 2.....:	2,847	
3.) Parâmetros de Infiltração	K:	0,03781	DTM.....:	5,0
	a:	0,165	PHI.....:	0,6
	fo:	0,000152	THETA.....:	0,6
	$Z = K * T^a + fo * T, (m^3 m^{-1})$			
4.) Comprimento do Sulco (m).....:	67,0	DEL.....:	12,5	
5.) Espaçamento entre Sulcos (m).....:	1,0	GAMA 1.....:	1,60569	
6.) Tempo de Corte para Fluxo Contínuo (min).....:	90,0	GAMA 2.....:	0,37001	
7.) Declividade.....:	0,003	SIGMA 1.....:	1,999	
8.) Lâmina Requerida	0,09	SIGMA 2.....:	1,562	
9.) Intervalo de Tempo para Inc. do Avanço (min):	5,0			

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande
 CCT - Centro de Ciências e Tecnologia
 DEAg - Departamento de Engenharia Agrícola
 Irrigação e Drenagem
 SASIS - Software Aplicado à Simulação de Irrigação por Superfície

Nome do Experimento: **PISG2**

Irrigação Superficial - Modelo de Roberto V. Pordeus

Balço de Volume

Fluxo Total de Entrada.....: 10,143
 Vol. Total Infiltrado.....: 10,22251
 Volume Escoado.....: -0,07951
 Volume Percolado.....: 5,391998
 Vol. Armaz. na Zona de Raiz: 4,830512
 Vol. de Déficit.....: 0,209488

Análise de Eficiência-Uniformidade

Efic. de Aplicação.....: 47,624094
 Efic. de Armazenamento: 95,843488
 Unif. de Distribuição.....: 100,0
 Unif. de Dist. Absoluta...: 84,682783
 Tx. de Escoamento.....: -0,78389
 Tx. Percolada.....: 53,159796

Trajétória de Avanço/Recessão e Perfil de Infiltração

Nó	XA (m)	TA (min)	TR (min)	Tau (m ³ m. ⁻¹)	TZ (m ³ m. ⁻¹)	VZ (m ³ m. ⁻¹)	VZAC (m ³ m. ⁻¹)	LAZRC (m ³ m. ⁻¹)
1	6,3	5,0	115,0	110,0	0,1403	0,4447	0,4447	0,0803
2	12,7	10,0	115,0	105,0	0,1355	0,8774	1,3221	0,0755
3	19,1	15,0	115,0	100,0	0,1330	0,8640	2,1861	0,0730
4	25,6	20,0	115,0	95,0	0,1304	0,8547	3,0407	0,0704
5	32,2	25,0	115,0	90,0	0,1278	0,8453	3,8861	0,0678
6	38,8	30,0	115,0	85,0	0,1250	0,8354	4,7215	0,0650
7	45,5	35,0	115,0	80,0	0,1222	0,8248	5,5463	0,0622
8	52,2	40,0	115,0	75,0	0,1194	0,8134	6,3597	0,0594
9	59,0	45,0	115,0	70,0	0,1164	0,8012	7,1610	0,0564
10	65,9	50,0	115,0	65,0	0,1133	0,7881	7,9490	0,0533
11	72,8	55,0	115,0	60,0	0,1100	0,7738	8,7228	0,0500
12	79,8	60,0	115,0	55,0	0,1067	0,7583	9,4811	0,0467
13	84,0	65,0	115,0	50,0	0,1031	0,7414	10,2225	0,0431

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande
 CCT - Centro de Ciências e Tecnologia
 DEAg - Departamento de Engenharia Agrícola
 Irrigação e Drenagem
 SASIS - Software Aplicado à Simulação de Irrigação por Superfície

Nome do Experimento: **PISG2**

Irrigação Superficial - Modelo de Roberto V. Pordeus

Balanco de Volume

Fluxo Total de Entrada.....: 10,143
 Vol. Total Infiltrado.....: 10,22251
 Volume Escoado.....: -0,07951
 Volume Percolado.....: 5,391998
 Vol. Armaz. na Zona de Raiz: 4,830512
 Vol. de Déficit.....: 0,209488

Análise de Eficiência-Uniformidade

Efic. de Aplicação.....: 47,624094
 Efic. de Armazenamento: 95,843488
 Unif. de Distribuição.....: 100,0
 Unif. de Dist. Absoluta...: 84,682783
 Tx. de Escoamento.....: -0,78389
 Tx. Percolada.....: 53,159796

Trajétoria de Avanço/Recessão e Perfil de Infiltração

Nó	XA (m)	TA (min)	TR (min)	Tau (m ³ m ⁻¹)	TZ (m ³ m ⁻¹)	VZ (m ³ m ⁻¹)	VZAC (m ³ m ⁻¹)	LAZRC (m ³ m ⁻¹)
----	-------------	---------------	---------------	--	---	---	---	--

Dados de Entrada:

1.) Fluxo de Entrada --- (L m⁻¹).....: 1,47 RHO 1.....: 0,185
 2.) "n" de Manning --- (0,02 - 0,15).....: 0,02 RHO 2.....: 2,766
 3.) Parâmetros de Infiltração K: 0,02931 DTM.....: 5,0
 Z = K * T^a + fo * T, (m³ m⁻¹) a: 0,302 PHI.....: 0,6
 fo: 0,000152 THETA.....: 0,6
 4.) Comprimento do Sulco (m).....: 84,0 DEL.....: 12,5
 5.) Espaçamento entre Sulcos (m).....: 1,0 GAMA 1.....: 1,60569
 6.) Tempo de Corte para Fluxo Contínuo (min).....: 115,0 GAMA 2.....: 0,37001
 7.) Declividade.....: 0,0016 SIGMA 1.....: 3,299
 8.) Lâmina Requerida: 0,06 SIGMA 2.....: 1,731
 9.) Intervalo de Tempo para Inc. do Avanço (min): 5,0

ANEXO IV
SIMULAÇÃO SIRMOD

***** KINEMATIC-WAVE MODEL *****

PISG1

Inflow, lps/s/m or furrow = 1.3300 Field Slope, m/m = 0.0030
 Manning's n Coefficient = 0.020 Field Length, m = 67.0
 Kost.-Lewis k, m**3/min**a/m = 0.03781
 a = 0.1650 fo, m**3/min/m = 0.000152
 Time Step in minutes = 5.0 Time of Cutoff, minutes = 90.0
 Space Weight Factor, PHI = 0.51 Time Weight Factor, THETA = 0.60
 Application Depth, ZREQ, m = 0.09
 Section Parameter, RH01 = 0.291 RH02 = 2.847
 where $A^{2R} \cdot 1.33 = RH01 \cdot A^{RH02}$

 Section Parameter, SIGMA1 = 1.999 SIGMA2 = 1.562
 where $A = SIGMA1 \cdot Y^{SIGMA2}$

 Downstream Boundary ALPHB = 1.4773 AMPB = 1.4235
 where $Q_{out} = ALPHB \cdot A^{AMPB}$

Continuous Flow Advance-Recession Trajectory

Node	XA (m)	TA (min)	TR (min)	2 (m**3/m)	(m**3/m)
0	0.0	0.0	95.0	0.09604	0.09604
1	7.0	5.0	100.0	0.09460	0.09460
2	24.5	20.0	100.0	0.09162	0.09162
3	34.6	30.0	105.0	0.08849	0.08849
4	48.4	45.0	105.0	0.08342	0.08342
5	57.0	55.0	105.0	0.07970	0.07970
6	61.2	60.0	105.0	0.07770	0.07770
7	65.2	65.0	105.0	0.07557	0.07557
8	67.0	67.2	105.0	0.05714	0.05714

Field Tailwater Hydrograph

Elapsed Time (min)	Tailwater Flow (m**3/sec)	Cumulative Tailwater (m**3)
70.0	2.002e-004	0.060
75.0	7.965e-004	0.299
80.0	7.122e-004	0.513
85.0	8.941e-004	0.781
90.0	8.527e-004	1.037
95.0	7.484e-004	1.261
100.0	3.225e-004	1.358
105.0	8.086e-005	1.382

Volume Balance

Total Inflow = 7.182 m**3
 Total Infilt = 5.850 m**3
 Total Runoff = 1.382 m**3

Error = 0.701 percent

Efficiency - Uniformity Analysis

Application Efficiency = 79.9 percent
 Storage Efficiency = 95.2 percent
 Distribution Uniformity = 87.6 percent
 Abs. Dist. Uniformity = 66.0 percent

***** HYDRODYNAMIC MODEL *****

PISG2

Inflow, lps/s/m or furrow = 1.4700 Field Slope, m/m = 0.0016
 Manning's n Coefficient = 0.020 Field Length, m = 84.0
 Kost.-Lewis k, $m^3/min^a/m$ = 0.02931
 a = 0.3020 $f_0, m^3/min/m$ = 0.000152
 Time Step in minutes = 5.0 Time of Cutoff, minutes = 115.0
 Space Weight Factor, PHI = 0.60 Time Weight Factor, THETA = 0.60
 Application Depth, ZREQ, m = 0.06
 Section Parameter, RHO1 = 0.185 RHO2 = 2.766
 where $A^{*2}R^{*1.33} = RHO1*A^{*}RHO2$

 Section Parameter, SIGMA1 = 3.299 SIGMA2 = 1.731
 where $A = SIGMA1*Y^{*}SIGMA2$

 Downstream Boundary ALPHB = 0.0000 AMPB = 1.4000
 where $Q_{out} = ALPHB*A^{*}AMPB$

Continuous Flow Advance-Recession Trajectory

Node	XA	TA	TR	Z	TZ
	(m)	(min)	(min)	(m^3/m)	(m^3/m)
0	0.0	0.0	126.3	0.14448	0.14448
1	10.3	5.0	126.3	0.14217	0.14217
2	15.7	10.0	126.3	0.13981	0.13981
3	20.6	15.0	126.3	0.13740	0.13740
4	25.5	20.0	126.3	0.13493	0.13493
5	29.8	25.0	126.3	0.13241	0.13241
6	34.0	30.0	126.3	0.12983	0.12983
7	41.6	40.0	126.3	0.12444	0.12444
8	45.1	45.0	126.3	0.12163	0.12163
9	48.5	50.0	126.3	0.11872	0.11872
10	51.8	55.0	126.3	0.11571	0.11571
11	58.1	65.0	126.3	0.10932	0.10932
12	61.1	70.0	134.1	0.11078	0.11078
13	66.8	80.0	134.1	0.10391	0.10391
14	69.6	85.0	134.1	0.10020	0.10020
15	74.9	95.0	134.1	0.09202	0.09202
16	77.5	100.0	134.1	0.08742	0.08742
17	80.0	105.0	143.8	0.08943	0.08943
18	82.5	110.0	143.8	0.09003	0.09003
19	84.0	113.6	143.8	0.06747	0.06747

No Field Tailwater 115.0 1.125e-013 0.000

Volume Balance

Total Inflow = 10.143 m**3

Total Infilt = 10.144 m**3

Total Runoff = 0.000 m**3

Error = 0.006 percent

Efficiency - Uniformity Analysis

Application Efficiency = 49.7 percent

Storage Efficiency = 100.0 percent

Distribution Uniformity = 77.5 percent

Abs. Dist. Uniformity = 56.4 percent

ANEXO V
VAZÃO ÓTIMA

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande
 CCT - Centro de Ciências e Tecnologia
 DEAg - Departamento de Engenharia Agrícola
 Irrigação e Drenagem
 SASIS - Software Aplicado à Simulação de Irrigação por Superfície

Irrigação Superficial - Modelo de Roberto V. Pordeus

Determinação da Vazão Ótima

Fluxo Total de Entrada/Vazão de Entrada.....: 1,47
 Vazão Máxima Determinada.....: 5,92
 Variação Percentual Aplicada a Vazão de Entrada: 2 %

Vazão Ótima.....1,6473

Nome do Experimento: [PISG2]

Vazão	Efic. de Aplicação Ea (%)	Tx de Escoamento Te (%)	Tx de Percolação Tp (%)
1,6473 V.I.	50,7178	0,1742	49,1080
1,6802	45,6568	8,3770	45,9662
1,7138	45,0765	9,5858	45,3377
1,7481	44,5009	10,7433	44,7558
1,7830	43,9316	11,8880	44,1804
1,8187	43,3687	13,0198	43,6115
1,8551	42,8120	14,1390	43,0490
1,8922	42,2616	15,2455	42,4929
1,9300	41,7173	16,3396	41,9431
1,9686	41,1791	17,4212	41,3997
2,0080	40,6471	18,4904	40,8625
2,0482	40,1211	19,5474	40,3315
2,0891	39,6011	20,5923	39,8066
2,1309	39,0870	21,6251	39,2879
2,1735	38,5789	22,6460	38,7751
2,2170	34,4176	29,6416	35,9408
2,2613	33,9690	30,5905	35,4405
2,3066	33,5247	31,4998	34,9755
2,3527	33,0855	32,3984	34,5161
2,3997	32,6516	33,2864	34,0620
2,4477	32,2228	34,1638	33,6134
2,4967	31,7990	35,0308	33,1702
2,5466	31,3803	35,8874	32,7323

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande
 CCT - Centro de Ciências e Tecnologia
 DEAg - Departamento de Engenharia Agrícola
 Irrigação e Drenagem
 SASIS - Software Aplicado à Simulação de Irrigação por Superfície

Irrigação Superficial - Modelo de Roberto V. Pordeus

Determinação da Vazão Ótima

Fluxo Total de Entrada/Vazão de Entrada.....: 1,47
 Vazão Máxima Determinada.....: 5,92
 Variação Percentual Aplicada a Vazão de Entrada: 2 %

Vazão Ótima.....1,6473

Nome do Experimento: [PISG2]

Vazão	Efic. de Aplicação Ea (%)	Tx de Escoamento Te (%)	Tx de Percolação Tp (%)
2,5976	30,9666	36,7337	32,2997
2,6495	30,5578	37,5699	31,8722
2,7025	30,1540	38,3960	31,4500
2,7565	29,7550	39,2122	31,0329
2,8117	29,3608	40,0184	30,6208
2,8679	28,9713	40,8149	30,2138
2,9253	28,5866	41,6017	29,8117
2,9838	25,2344	47,4282	27,3374
3,0434	24,8987	48,1499	26,9514
3,1043	24,5666	48,8421	26,5913
3,1664	24,2386	49,5258	26,2357
3,2297	23,9146	50,2010	25,8844
3,2943	23,5946	50,8678	25,5376
3,3602	23,2786	51,5263	25,1951
3,4274	22,9665	52,1767	24,8568
3,4960	22,6583	52,8189	24,5228
3,5659	22,3539	53,4531	24,1929
3,6372	22,0534	54,0794	23,8672
3,7099	21,7566	54,6978	23,5457
3,7841	21,4635	55,3084	23,2281
3,8598	21,1741	55,9113	22,9146
3,9370	20,8883	56,5067	22,6050
4,0158	20,6062	57,0945	22,2994

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande
 CCT - Centro de Ciências e Tecnologia
 DEAg - Departamento de Engenharia Agrícola
 Irrigação e Drenagem
 SASIS - Software Aplicado à Simulação de Irrigação por Superfície

Irrigação Superficial - Modelo de Roberto V. Pordeus

Determinação da Vazão Ótima

Fluxo Total de Entrada/Vazão de Entrada.....: 1,47
 Vazão Máxima Determinada.....: 5,92
 Variação Percentual Aplicada a Vazão de Entrada: 2 %

Vazão Ótima.....1,6473

Nome do Experimento: [PISG2]

Vazão	Efic. de Aplicação Ea (%)	Tx de Escoamento Te (%)	Tx de Percolação Tp (%)
4,0961	20,3276	57,6748	21,9976
4,1780	20,0525	58,2478	21,6997
4,2616	17,4751	62,8675	19,6574
4,3468	17,2384	63,3855	19,3761
4,4337	17,0044	63,8826	19,1130
4,5224	16,7734	64,3733	18,8532
4,6128	16,5454	64,8578	18,5968
4,7051	16,3204	65,3360	18,3437
4,7992	16,0982	65,8080	18,0938
4,8952	15,8788	66,2740	17,8472
4,9931	15,6623	66,7340	17,6037
5,0930	15,4486	67,1880	17,3634
5,1948	15,2377	67,6361	17,1262
5,2987	15,0294	68,0785	16,8921
5,4047	14,8239	68,5150	16,6610
5,5128	14,6211	68,9459	16,4330
5,6230	14,4208	69,3712	16,2079
5,7355	14,2232	69,7910	15,9858
5,8502	14,0282	70,2053	15,7665

Irrigação Superficial - Modelo de Roberto V. Pordeus

Determinação da Vazão Ótima

Fluxo Total de Entrada/Vazão de Entrada.....: 1,33
 Vazão Máxima Determinada.....: 2,33
 Variação Percentual Aplicada a Vazão de Entrada: 2 %

Vazão Ótima.....1,0446

Nome do Experimento: [PISG1]

Vazão		Efic. de Aplicação Ea (%)	Tx de Escoamento Te (%)	Tx de Percolação Tp (%)
1,0446	V.I.	82,7094	9,9168	7,3738
1,0655	V.I.	81,7072	11,0190	7,2738
1,0868	V.I.	80,7269	12,0872	7,1859
1,1086		79,7566	13,1445	7,0989
1,1307		78,7961	14,1911	7,0128
1,1533		77,8455	15,2269	6,9276
1,1764		76,9046	16,2521	6,8433
1,1999		75,9734	17,2666	6,7599
1,2239		75,0519	18,2707	6,6774
1,2484		74,1400	19,2643	6,5958
1,2734		73,2375	20,2475	6,5150
1,2988		72,3446	21,2203	6,4351
1,3248		71,4610	22,1830	6,3560
1,3513		70,5868	23,1354	6,2778
1,3783		69,7218	24,0777	6,2005
1,4059		68,8661	25,0099	6,1240
1,4340		68,0195	25,9322	6,0483
1,4627		67,1820	26,8445	5,9734
1,4920		57,0664	37,0342	5,8994
1,5218		56,3528	37,8299	5,8173
1,5522		55,6542	38,6008	5,7450
1,5833		54,9633	39,3632	5,6735
1,6150		54,2799	40,1173	5,6028

Irrigação Superficial - Modelo de Roberto V. Pordeus

Determinação da Vazão Ótima

Fluxo Total de Entrada/Vazão de Entrada.....: 1,33
 Vazão Máxima Determinada.....: 2,33
 Variação Percentual Aplicada a Vazão de Entrada: 2 %

Vazão Ótima.....1,0446

Nome do Experimento: [PISG1]

Vazão	Efic. de Aplicação Ea (%)	Tx de Escoamento Te (%)	Tx de Percolação Tp (%)
1,6473	53,6041	40,8630	5,5329
1,6802	52,9358	41,6005	5,4637
1,7138	52,2748	42,3298	5,3954
1,7481	51,6213	43,0510	5,3278
1,7830	50,9750	43,7640	5,2609
1,8187	50,3360	44,4691	5,1948
1,8551	49,7042	45,1663	5,1295
1,8922	49,0795	45,8556	5,0649
1,9300	48,4619	46,5371	5,0011
1,9686	47,8512	47,2108	4,9379
2,0080	47,2475	47,8769	4,8755
2,0482	46,6507	48,5354	4,8138
2,0891	46,0607	49,1864	4,7529
2,1309	45,4775	49,8299	4,6926
2,1735	44,9010	50,4660	4,6330
2,2170	44,3311	51,0948	4,5741
2,2613	43,7678	51,7163	4,5159
2,3066	36,0741	59,4675	4,4584