

Ana Beatriz Alves de Araújo
Roberto Vieira Pordeus
(Organizadores)

MODELO PARA PREDIÇÕES DE IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE

Ana Beatriz Alves de Araújo
Roberto Vieira Pordeus

**MODELO PARA PREDIÇÕES DE
IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE**

1ª edição

Editora Itacaiúnas
Ananindeua – PA
2023

©2022 por Ana Beatriz Alves de Araújo e Roberto Vieira Pordeus. (orgs.)

© 2022 por diversos autores

Todos os direitos reservados.

1ª edição

Conselho editorial / Colaboradores

Márcia Aparecida da Silva Pimentel – Universidade Federal do Pará, Brasil

José Antônio Herrera – Universidade Federal do Pará, Brasil

Márcio Júnior Benassuly Barros – Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil

Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil

Wildoberto Batista Gurgel – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Brasil

André Luiz de Oliveira Brum – Universidade Federal de Rondônia, Brasil

Mário Silva Uacane – Universidade Licungo, Moçambique

Francisco da Silva Costa – Universidade do Minho, Portugal

Ofélia Pérez Montero - Universidad de Oriente – Santiago de Cuba, Cuba

Editora-chefe: Viviane Corrêa Santos – Universidade do Estado do Pará, Brasil

Editor e web designer: Walter Luiz Jardim Rodrigues – Editora Itacaiúnas, Brasil

Editor e diagramador: Deivid Edson Corrêa Barbosa - Editora Itacaiúnas, Brasil

Edição eletrônica/ diagramação: Walter Rodrigues

Projeto de capa: dos organizadores

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

O88 Modelo para predições de irrigação por superfície [recurso eletrônico] /
vários autores; organizado por Ana Beatriz Alves de Araújo e Roberto Vieira
Pordeus. - Ananindeua: Editora Itacaiúnas, 2023.

87 p.: il.: PDF, 3,0 MB.

Inclui bibliografia e índice.

ISBN: 978-85-9535-233-9 (Ebook)

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-233-9

1. Engenharia. 2. Sistema de Irrigação. 3. Fluxo contínuo. 4. Desempenho,
5. SASIS. 6. Otimização da irrigação. I. Título.

CDD 620

CDU 631.7

Índice para catálogo sistemático:

1. Engenharia 620
2. Engenharia Agrícola e das Terras 631.7

E-book publicado no formato PDF (*Portable Document Format*). Utilize software [Adobe Reader](#) para uma melhor experiência de navegabilidade nessa obra.

O conteúdo desta obra, inclusive sua revisão ortográfica e gramatical, bem como os dados apresentados, é de responsabilidade de seus participantes, detentores dos Direitos Autorais.

Esta obra foi publicada pela [Editora Itacaiúnas](#) em agosto de 2023.

Sumário

OTIMIZAÇÃO DA VAZÃO DA IRRIGAÇÃO POR SULCO COM FLUXO CONTINUO PELO MODELO SASIS.....7

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-233-9_001

Bianca Carolina Bernardin CATTANI
Ana Beatriz Alves de ARAÚJO
Luis Antônio DANTAS
Roberto Vieira PORDEUS
Carlos Alberto Vieira de AZEVEDO,
Márcia Rejane de Queiroz Almeida AZEVEDO
José Espínola SOBRINHO

ESTIMATIVA DA VAZÃO MÁXIMA PELO MODELO SASIS: SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS EMPÍRICOS DA FORMA DO SULCO 29

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-233-9_002

Bianca Carolina Bernardin CATTANI
Ana Beatriz Alves de ARAÚJO
Roberto Vieira PORDEUS
Carlos Alberto Vieira de AZEVEDO
Liherton Ferreira dos SANTOS
José Dantas NETO

SIMULAÇÃO E PROGNÓSTICO DO DESEMPENHO DA IRRIGAÇÃO SOFTWARE APLICADO À SIMULAÇÃO DE IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE (SASIS) 43

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-233-9_003

Bianca Carolina Bernardin CATTANI
Ana Beatriz Alves de ARAÚJO
Samara Nascimento de LIMA
Luis Antônio DANTAS
Roberto Vieira PORDEUS
Carlos Alberto Vieira de AZEVEDO
José Espínola SOBRINHO

PROGNÓSTICO DO BALANÇO DE VOLUME D'ÁGUA NA IRRIGAÇÃO POR SULCO PELOS MODELOS SASIS E SIRMOD 60

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-233-9_004

Ana Beatriz Alves de ARAÚJO
Bianca Carolina Bernardin CATTANI
Roberto Vieira PORDEUS
Carlos Alberto Vieira de AZEVEDO
Luiz Antônio DANTAS
Márcia Rejane de Queiroz Almeida AZEVEDO
José Espínola SOBRINHO

**SIMULAÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR SULCO PELO MODELO SASIS: SENSIBILIDADE
AOS FATORES DE FATORES DE PONDERAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL..... 74**

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-233-9_005

Ana Beatriz Alves de ARAÚJO
Bianca Carolina Bernardin CATTANI
Arthur Egon Hermes BRIETZKE
Roberto Vieira PORDEUS
Carlos Alberto Vieira de AZEVEDO
Luiz Antônio DANTAS
Liherton Ferreira dos SANTOS

SOBRE OS AUTORES.....87

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, em geral, do dimensionamento e manejo inadequados. Assim sendo objetivou-se, com esta pesquisa 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 à 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 ocorrido 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 se pode 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, conseqüentemente, otimizar o desempenho do sistema de irrigação por sulco com fluxo contínuo.

(Os organizadores)

OTIMIZAÇÃO DA VAZÃO DA IRRIGAÇÃO POR SULCO COM FLUXO CONTINUO PELO MODELO SASIS

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-233-9_001

¹Bianca Carolina Bernardin CATTANI,
Engenharia Agrícola e Ambiental, Graduanda, UFERSA, Mossoró-RN, biancattani@gmail.com

²Ana Beatriz Alves de ARAÚJO,
Doutora em Engenharia Agrícola e Ambiental, UFERSA, Mossoró-RN, beatrizufersa@gmail.com

³Luis Antônio DANTAS,
Programador, UFCG, Campina Grande-PB, dantasluisinho@gmail.com

⁴Roberto Vieira PORDEUS,
Dr. Prof., UFERSA, Mossoró-RN, rpordeus@ufersa.edu.br

⁵Carlos Alberto Vieira de AZEVEDO,
Dr. Prof., UFCG, Campina Grande-PB, cveiradeazevedo@gmail.com

⁶Márcia Rejane de Queiroz Almeida AZEVEDO,
Dra. Profa., UEPB, Lagoa Seca-PB, marciarqaa@ibest.com.br

⁷José Espínola SOBRINHO,
Dr. Prof., UFERSA, Mossoró-RN, jespínola@ufersa.edu.br

OTIMIZAÇÃO DA VAZÃO DA IRRIGAÇÃO POR SULCO COM FLUXO CONTINUO PELO MODELO SASIS

RESUMO: Os sistemas de irrigação por superfície continuam sendo os mais utilizados no mundo inteiro, principalmente devido à economia de energia e sua facilidade de operação; no entanto, apresentam baixos níveis de desempenho como consequência, em geral, do dimensionamento e manejo inadequados. Assim sendo objetivou-se, com esta pesquisa 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. O modelo proposto, escrito na linguagem de programação DELPHI 5.0 e denominado SASIS, “Software Aplicado à 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 ocorrido para vazões próximas da mínima permitida.

PALAVRAS-CHAVE: Irrigação por sulco; Simulação; Otimização.

OPTIMIZATION OF THE FLOW OF FLOOR IRRIGATION WITH CONTINUOUS FLOW BY THE SASIS MODEL

ABSTRACT: The overhead irrigations for surface continue being the more used in the whole world, mainly due to the economy of energy and its operation easiness; however, these systems present low levels of performance, usually, because 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 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.

KEYWORDS: Furrow irrigation; Simulation; Optimization.

INTRODUÇÃO

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 irrigação por superfície é um sistema de irrigação onde a água escoar por gravidade, utilizando a superfície do solo agrícola como parte do sistema de distribuição de água. A vazão diminui à medida que a água avança na parcela irrigada devido a infiltração no solo. Para que a lâmina de água infiltrada se distribua o mais uniforme possível ao longo da parcela é preciso projetar e manejar a irrigação de tal forma que haja um equilíbrio entre os processos de avanço e infiltração da água (LOPEZ, 2013).

Sulco de irrigação é um método de irrigação, que é amplamente utilizado devido ao seu baixo custo em material e energia. Irrigação por sulco tem baixa eficiência de aplicação, enquanto que os sistemas de irrigação mais novos têm muito maior eficiência de aplicação (AMPAS e BALTAS, 2009). 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. A utilização de testes de avaliação seria recomendável, apesar do elevado custo e tempo necessários à execução dos trabalhos de campo e análise dos resultados. Além disso, torna-se praticamente impossível a avaliação de resultados combinados dos inúmeros parâmetros envolvidos no dimensionamento e operação dos sistemas.

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 da 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 à 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. A infiltração depende fundamentalmente das características físicas, químicas e biológicas do solo, afetando os processos de avanço e recesso de água, e é importante para a estimativa do fluxo ideal derivada num terreno irrigado (WALKER et al., 2006). Em um bom projeto de irrigação por sulco deve-se considerar essas variáveis e as interações entre elas (WU e LIANG, 1970); (REDDY e CLYMA, 1981).

A simulação matemática 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 e KATOPODES, 1977); (ELLIOTT et al., 1982); (WALKER e HUMPHERYS, 1983); (STRELKOFF e SOUZA, 1984); (RAYEJ e WALLENDER, 1985), (AZEVEDO, 1992) e tais modelos simulam o avanço e a recessão da água ao longo da superfície do solo e o volume de água infiltrado, escoado e percolado.

Os diferentes modelos de simulação da irrigação por superfície foram desenvolvidos para simular um evento de irrigação isolado, assumindo-se que não existe variabilidade espacial nos parâmetros de campo (infiltração, rugosidade, declividade e seção transversal); na prática, tem-se verificado a validade desta hipótese, tendo em vista que as simulações se têm aproximado bastante das medições de campo das fases, porém, 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.

Objetivou-se, neste trabalho, 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.

MATERIAL E MÉTODOS

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 haver 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 são designados ondas cinemáticas. A designação de modelos de escoamento uniforme, também usada, se deve, 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

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (1)$$

Equação de Manning

$$A = \sqrt{\frac{Q^2 n^2}{S_o R^{4/3}}} \quad (2)$$

Onde:

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

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:

$$y = \sigma_1 A^{\sigma_2} \quad (3)$$

$$A^2 R^{1,33} = \rho_1 A^{\rho_2} \quad (4)$$

Onde:

y - altura de fluxo no sulco, m;

A - área da seção transversal do escoamento, m²;

R - respectivo raio hidráulico, m;

$\sigma_1, \sigma_2, \rho_1$ e ρ_2 - parâmetros empíricos que dependem da forma do sulco.

Os parâmetros geométricos empíricos $\sigma_1, \sigma_2, \rho_1$, 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 e outra.

A hipótese descrita garante 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 4, chega-se a:

$$S_0 = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{1,33}} = \frac{Q^2 n^2}{\rho_1 A^{\rho_2}} \quad (5)$$

em que: Q é a descarga de fluxo em m³ s⁻¹; n é o coeficiente de Manning em m^{-1/3} s; e S_0 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 (1), seguindo-se uma cadeia de transformações que, afinal, compõem o desenvolvimento do modelo (WALKER e HUMPHERYS, 1983).

Em virtude das Equações 2 e 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_0 se aproximar de zero. Strelkoff e Katopodes (1977) acharam que ele simula melhor as condições de escoamento quanto maior for a declividade longitudinal. Walker e Skogerboe (1987) referem que este tipo de modelo não simula bem a fase de recessão.

Usando-se a relação da Equação 3, a equação de Manning se tornará:

$$Q = \alpha A^m \quad (6)$$

em que:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\rho_1 S_0}}{n} \quad (7)$$

$$m = \frac{\rho_2}{2} \quad (8)$$

Onde:

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

S_0 - declividade do sulco, m m⁻¹;

ρ_1 e ρ_2 - constantes empíricas ajustadas às medições de campo atuais da geometria do sulco;

α e m - constantes empíricas.

Fases de depleção e recessão - Geralmente, diz-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 negligenciaram-se as fases de depleção e recessão, considerando-se que a irrigação se encerra quando o fluxo d'água é suspenso, isto é, admitiu-se que o tempo de recessão é igual ao tempo de corte.

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

$$Z = k\tau^a + f_o\tau \quad (9)$$

Onde:

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;

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

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

$$Q_{m\acute{a}x} = \left[\left(\frac{V_{m\acute{a}x}^{\rho_2} n^2}{3600 S_o \rho_1} \right) \right]^{\frac{1}{\rho_2-2}} \quad (10)$$

Onde:

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

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

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

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

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

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 se sucedendo 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, a melhor eficiência de aplicação de água, atendendo à lâmina requerida de projeto.

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 satisfatórios de desempenho.

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

$$V_z = \frac{L}{2n} [Z_o + (2Z_1 + 2Z_2 + \dots + 2Z_{n-1}) + Z_n] \quad (11)$$

Onde:

L - comprimento da área, m;

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

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

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

$$Z_i = k [t_r - (t_a)_i]^a + f_o [t_r - (t_a)_i] \quad (12)$$

Onde:

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;

$(t_a)_i$ - 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 12.

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 o término da recessão. A Figura 1 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.

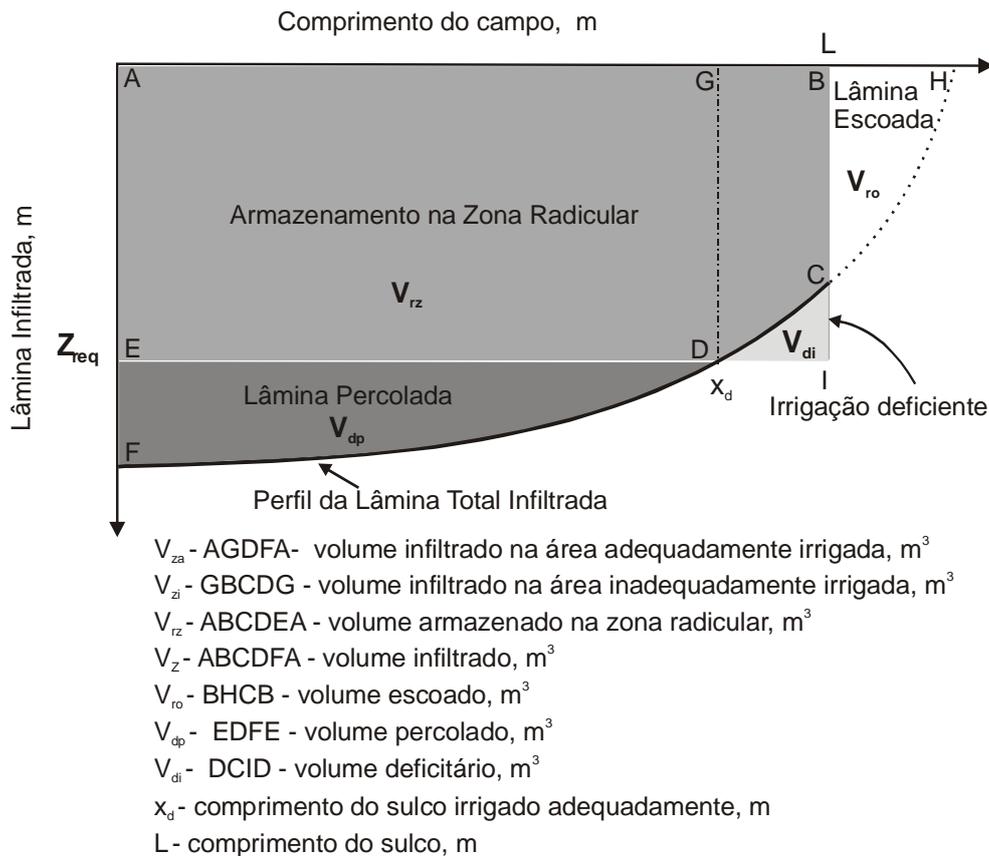


Figura 1. Componentes da água infiltrada na irrigação superficial.

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

Uniformidade de distribuição refere-se à distribuição de água no perfil do solo. Merriam e 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 a área (\bar{Z}). Este termo pode ser representado pelo símbolo UD . Os mesmos autores também sugerem uma uniformidade

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).

de distribuição absoluta, UD_a , que é a lâmina mínima (Z_{min}) dividida pela lâmina média de toda a área; assim:

Para condição de irrigação sem déficit, utilizaram-se as equações abaixo:

$$E_a = \frac{Z_{req} L}{Q \cdot t_{com}} 100 \quad (13)$$

$$TP = \frac{V_z - Z_{req} L}{Q \cdot t_{com}} 100 \quad (14)$$

$$TE = 100 - E_a - TP \quad (15)$$

E_r = eficiência de armazenamento

$$E_r = 100\%$$

Onde:

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;

V_z - volume infiltrado, m^3 .

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

$$E_a = \frac{Z_{req} x_d + V_{zi}}{Q \cdot t_{com}} 100 \quad (16)$$

$$TP = \frac{V_{za} - Z_{req} x_d}{Q \cdot t_{com}} 100 \quad (17)$$

$$TE = 100 - E_a - TP \quad (18)$$

$$E_r = \frac{Z_{req} x_d + V_{zi}}{Z_{req} L} 100 \quad (19)$$

Onde:

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

x_d - comprimento do sulco irrigado adequadamente, m;

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

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 ;

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

$$UD = \left(\frac{Z_{lq}}{Z} \right) 100 \quad \text{ou} \quad UD = \left(\frac{L \cdot Z_{lq}}{V_{rz} + V_{dp}} \right) 100 \quad (20)$$

$$UDa = \left(\frac{Z_{min}}{Z} \right) 100 \quad \text{ou} \quad UDa = \left(\frac{L \cdot Z_{min}}{V_{rz} + V_{dp}} \right) 100 \quad (21)$$

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

$$E_a = \frac{V_{rz}}{V_{rz} + V_{dp} + V_{ro}} \quad (22)$$

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

$$E_r = \frac{V_{rz}}{V_{rz} + V_{di}} \quad (23)$$

Se parte do sulco apresentar 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. 11 e para a área inadequadamente irrigada, V_{zi} , com a seguinte:

$$V_{zi} = V_z - V_{za} \quad (24)$$

O volume escoado por unidade de largura é dado por:

$$V_{ro} = Q t_{com} - V_z \quad (25)$$

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

$$TE = \left(\frac{V_{ro}}{Q t_{com}} \right) 100 \quad (26)$$

A taxa de percolação como segue:

$$TP = 100 - E_a - TE \quad (27)$$

As simulações feitas pelo modelo SASIS apontam 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 e 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 GUFQCQ, 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 e Skogerboe (1987). O conjunto de dados DEMO1 é utilizado na demonstração do modelo SIRMOD. Esses conjuntos de dados (Tabela 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 2).

Tabela 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 ^{-a} 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_0 (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 e Skogerboe (1987); AMALGACQ e GUFCQ: publicada por Azevedo (1992), empregada 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 2. Dados de avanço d'água medido em campo e utilizados na validação do modelo SASIS.

PISG1		PISG2		PISG3		PISG4		KWF		AMALGAC Q		GUFCQ	
XA	T A	XA	TA	X A	T A	XA	T A	XA	TA	XA	TA	XA	T A
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	248	
60,3	27	81,82	13,6	63	19	103,5	48	240	102	279	120	279	
67	32	90,91	15,65	70	24	115	66	275	130	310	140	310	

100	17,9 5	30 0	15 0	341	155
		32 0	17 0	372	191
		35 0	20 0	403	232
		36 0	20 8		

PISG1, PISG2, PISG3 e PISG4: dados de campo obtidos no Perímetro Irrigado de São Gonçalo, estado da Paraíba, Brasil; KWF: publicado por Walker e Skogerboe (1987); AMALGACQ e GUFCQ: publicada por Azevedo (1992), empregada na demonstração do modelo SIRTOM; XA: distância de avanço d'água medido em campo, m; TA: tempo de avanço, min.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas geradas pelo modelo proposto para a performance da irrigação em função da vazão de adução, são apresentadas nas Figuras 1 a 7. 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 chegará até o 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, isto é, 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 deste 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 1 a 7, que as curvas que representam as taxas de escoamento e de percolação se interceptam para um valor de vazão, indicando uma mudança de efeito maior ou menor dessas perdas na eficiência de aplicação d'água, a partir deste valor. Vê-se que, quando há um equilíbrio entre as perdas de água por escoamento e por percolação, ou seja, quando elas estão balanceadas a 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 1), KWF (Figura 2), GUFCQ (Figura 3) e DEMO1 (Figura 4). 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 de 3,92% e a eficiência de aplicação de 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 5), PISG3 (Figura 6) e PISG4 (Figura 7), 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 escoamento estar-se-á, conseqüentemente, maximizando a eficiência de aplicação.

Para PISG1 (Figura 1) 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, de $2,33 \text{ L s}^{-1}$. Para as referidas vazões vê-se que as perdas por escoamento foram, respectivamente, 10,23 e 51,78%, enquanto as por percolação de 7,35 e 4,51%, resultando num prognóstico da eficiência de aplicação para a vazão ótima, de 82,42%, e para a vazão máxima, de 43,71%. Neste exemplo, as taxas de escoamento e percolação são pequenas, com mínima 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. Consta-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_0 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 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 praticada pelo irrigante foi de 77,74%; entretanto, este valor se aproximou do valor máximo que se pode conseguir para referidas condições de campo, indicando que o irrigante fez escolha da vazão que se aproximou do valor ótimo.

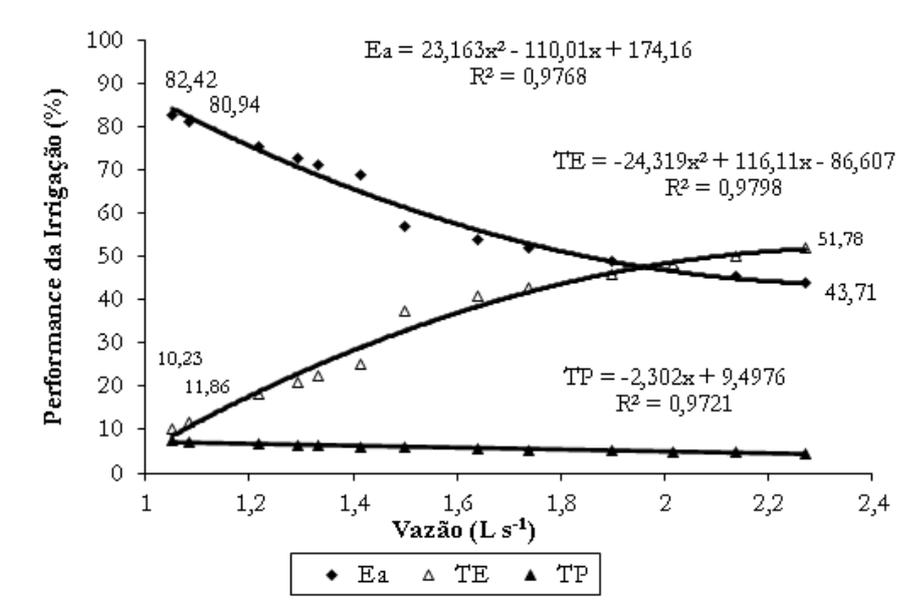


Figura 1. Performance da irrigação função da vazão de entrada (PISG1), vazão ótima $1,05 \text{ L s}^{-1}$, Ea - eficiência de aplicação, TE - taxa de escoamento e TP - taxa de percolação.

Para o exemplo KWF (Figura 2) o modelo prognosticou um valor de $1,62 \text{ L s}^{-1}$ para a vazão ótima, próxima da mínima, e de $3,01 \text{ L s}^{-1}$ 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, que para a vazão ótima as taxas de escoamento e percolação apresentam pequena diferença entre seus valores, com variação 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_0 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 praticada pelo irrigante.

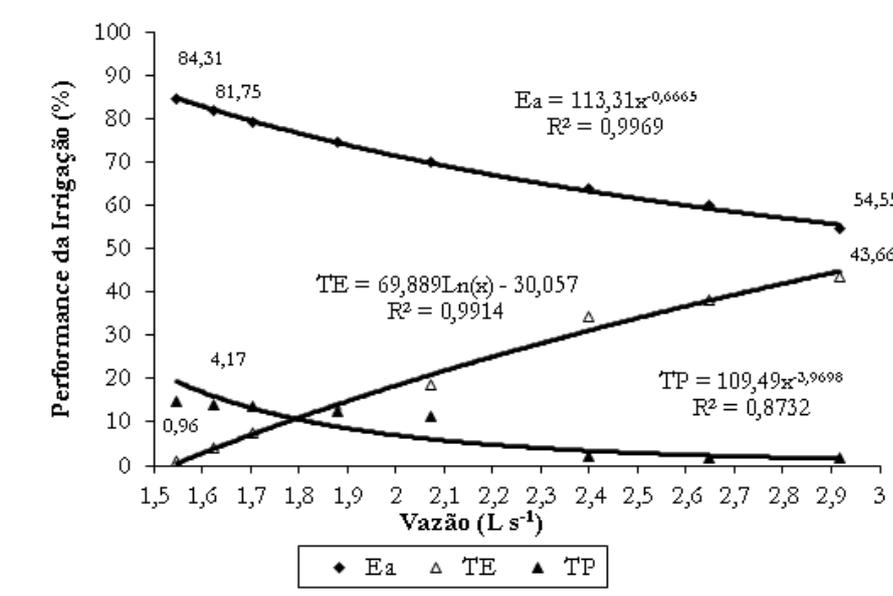


Figura 2. Performance da irrigação função da vazão de entrada (KWF), vazão ótima 1,6248 L s⁻¹, Ea: eficiência de aplicação; TE: taxa de escoamento e TP: taxa de percolação.

Para os dados de campo GUFQC (Figura 3) vê-se que a curva que se refere, à 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 relacionada à 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 L s⁻¹ e de 1,79 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, 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 as 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, seja para a vazão ótima ou 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_0 igual a 0,00022) e, ainda, pela declividade acentuada nesta área (0,0173 m m⁻¹). Para a vazão de projeto (1,30 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.

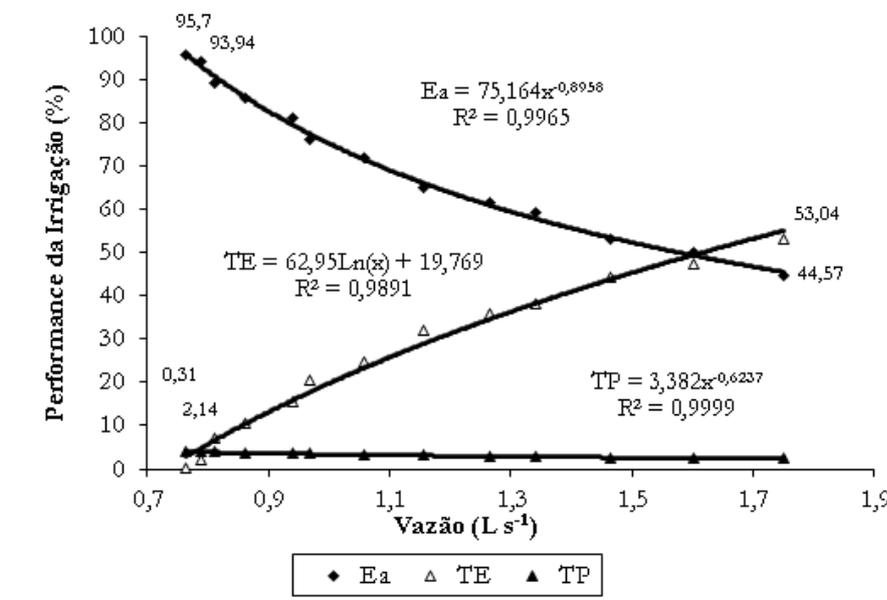


Figura 3. Performance da irrigação função da vazão de entrada (GUFCQ), vazão ótima 0,7879 L s⁻¹, Ea: eficiência de aplicação, TE: taxa de escoamento e TP: taxa de percolação.

Para o exemplo DEMO1 nota-se, na Figura 4, que a vazão ótima (0,84 L s⁻¹) está próxima da vazão mínima. O valor prognosticado pelo modelo para a vazão máxima foi de 1,77 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%. Observa-se que, neste exemplo, para a vazão ótima as taxas de escoamento e percolação são pequenas, com diferença percentual entre elas de apenas 10,65%, mas 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 previstos 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 mostra 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_s igual 0,00022) (Tabela 1), resultando num 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.

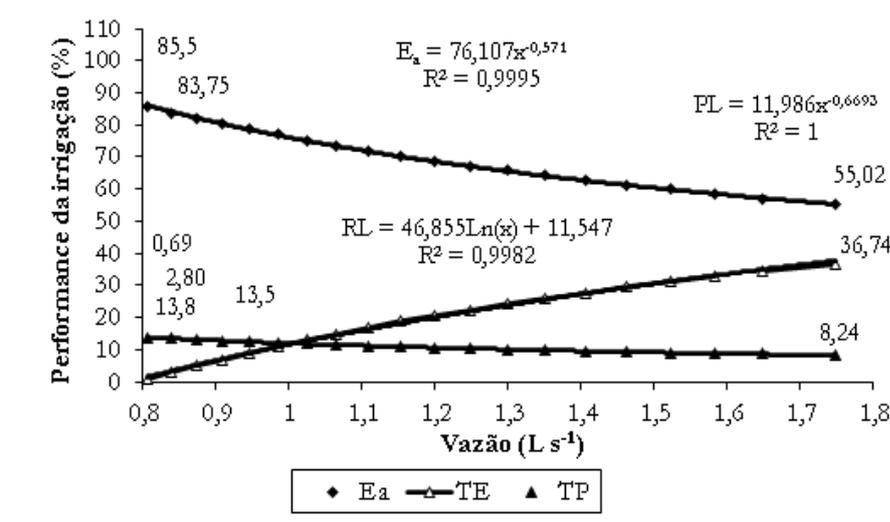


Figura 4. Performance da irrigação função da vazão de entrada (DEMO1), vazão ótima 0,84 L s⁻¹, Ea: eficiência de aplicação, TE: taxa de escoamento e TP: taxa de percolação.

Para PISG2 (Figura 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. Existe impossibilidade de se 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_0 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 as vazões 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.

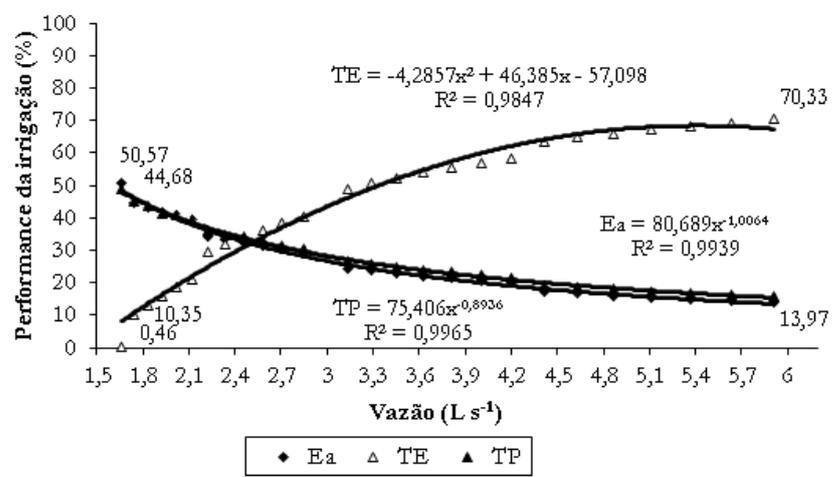


Figura 5. Performance da irrigação função da vazão de entrada (PISG2), vazão ótima 1,6631 L s⁻¹, Ea: eficiência de aplicação, TE: taxa de escoamento e TP: taxa de percolação.

Para os dados de campo PISG3 (Figura 6) o valor prognosticado pelo modelo para a vazão ótima foi de $0,64 \text{ L s}^{-1}$, próximo da vazão mínima e, para a vazão máxima, $1,56 \text{ L s}^{-1}$, cujas perdas por escoamento foram, respectivamente, 0,78 e 60,45%, enquanto as por percolação foram de 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%.

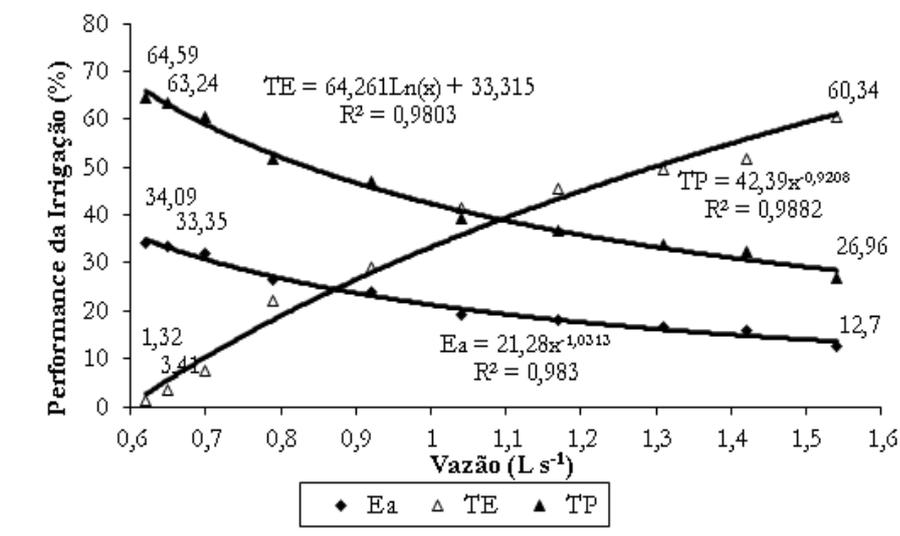


Figura 6. Performance da irrigação função da vazão de entrada (PISG3), vazão ótima $0,64 \text{ L s}^{-1}$, Ea: eficiência de aplicação, TE: taxa de escoamento e TP: taxa de percolação.

Nota-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 ($1,54 \text{ L s}^{-1}$) os valores prognosticados para a eficiência de aplicação, taxa de escoamento e taxa de percolação foram, respectivamente, 12,7, 60,3 e 27%, apresentando, daí valores previstos para as perdas bastante distintas, demonstrando que a vazão escolhida causará grandes perdas por escoamento, o que indica a necessidade de manejo da vazão para reduzir a diferença entre essas perdas.

No exemplo PSG4 (Figura 7), 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 de $2,02 \text{ L s}^{-1}$, 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) contribui substancialmente para esta condição de difícil manejo; entretanto, demonstra-se, 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 7, que as curvas que representam a eficiência de aplicação e a taxa de percolação

têm o mesmo comportamento, isto é, a mesma inclinação e com valores bem próximos, enquanto a curva referente à taxa de escoamento demonstra inclinação alta e valores bem distintos para as taxas de escoamento prognosticado para as vazões ótima e máxima.

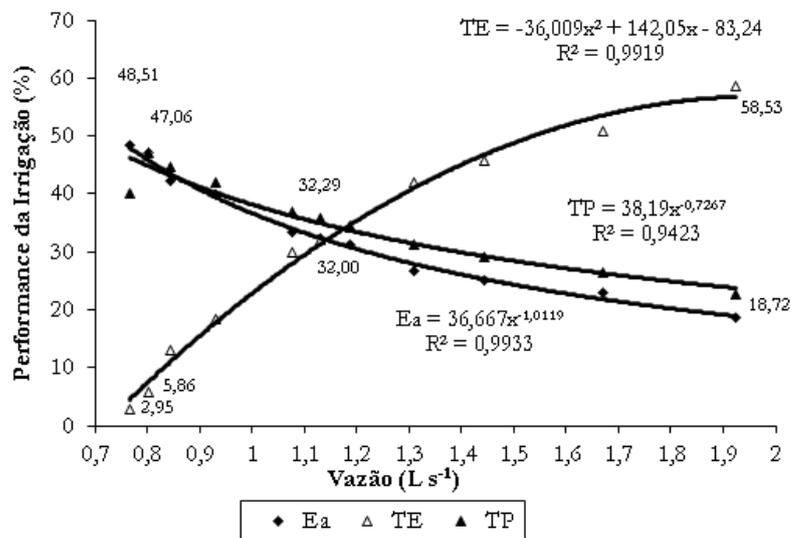


Figura 7. Performance da irrigação função da vazão de entrada (PISG4), vazão ótima 0,77 L s⁻¹; Ea: eficiência de aplicação, TE: taxa de escoamento e TP: taxa de percolação.

No que diz respeito à vazão de projeto (1,13 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 mostram 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 a vazão praticada pelo irrigante ter sido escolhida nas imediações dos pontos de intercessão dessas curvas.

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 pode-se 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_0 igual a 0,000152, coeficientes da Equação de Kostikov-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_0 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_0 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_0 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_0 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_0 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_0 igual a 0,000152).

Nas condições de campo em que se conseguiu controlar as perdas por escoamento e percolação, os solos apresentam taxas de infiltração baixas; para referidas condições de infiltração foi possível se obter um controle maior 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 comprovando, mais uma vez, que o comprimento e a declividade não interferem de forma decisiva na otimização.

Constata-se, então, que em solos com elevadas taxas de infiltração a maior dificuldade na otimização é minimizar as perdas por percolação, fato que contribui decisivamente para o não controle dessas perdas, uma vez que se pode, para referidas condições de campo, diminuir 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 minimizadas com facilidade. 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 por percolação podendo causar, quando se aproximarem de valores máximos permitidos, grandes perdas por escoamento, significando que o que se diminui ou se aumenta, em termos de perda por escoamento, é bem maior que o que se diminui ou se aumenta em termos de perdas por percolação, quando varia a vazão; em outras palavras e para uma mesma faixa de variação da vazão ocorrem maiores variações nas perdas por escoamento que por percolação, visto que a taxa do fluxo d'água no interior do solo (taxa de infiltração) depende apenas da textura e da estrutura do solo não sofrendo, então, qualquer 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 não apenas pelo tempo de aplicação d'água mas, também, 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, maiores lâminas infiltradas, principalmente quando se deseja 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 determinada vazão e seção transversal de fluxo e, enquanto a taxa de escoamento superficial depende, sobremaneira, dessa lâmina, de forma que, para determinada seção transversal de fluxo, quanto maior a vazão maior será a taxa de escoamento superficial; deve-se, então, 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. (2003c), que constaram maiores taxas de escoamento nos sulcos mais curtos e, em todos os exemplos analisados, essas taxas foram superiores às taxas de percolação. Silveira et al. (2000a) 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, concluíram 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 decréscimo da taxa de percolação; com o aumento da vazão de entrada, tendendo a se estabilizar 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. (2000a) em sulcos longos não se deve usar pequenas vazões e, em sulcos curtos, grandes vazões. Azevedo et al. (2003a) 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. (2003c). 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 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. (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, e 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 em um 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 eles, referidas variações foram conseqüência 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 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 eficiência de 70% a 85% (MERRIAM e KELLER, 1978); na verdade, alguns sistemas automatizados têm favorecido eficiência em torno de 90% (FISCHBACK e 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 e NUGTEREN, 1974); (CLYMA et al., 1975); (KRUSE e HEERMANN, 1977), (AZEVEDO et al., 1992).

Ampas e Baltas (2009) estudando vários métodos de otimização da eficiência da irrigação por sulcos, concluiu que o método linear decrescente foi mais eficiente para a determinação do valor ótimo da taxa de fluxo em cada etapa, onde segundo estes autores o fluxo de irrigação deve iniciar com baixa vazão aumentando gradativamente até atingir a vazão máxima não erosiva, em seguida, a taxa de fluxo é reduzida para realizar a infiltração instantânea.

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.

CONCLUSÃO

- O parâmetro de campo que mais dificultam 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;
- 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.

REFERÊNCIAS

- 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, 1992. 263p.
- 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, 2001. Paper n. 012165 p.1-13.
- 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. 2003a. CDROM.
- 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. 2003c. CDROM.
- BOS, M.G.; NUGTEREN, J. On Irrigation Efficiencies., Internacional Institute for Land Reclamation and Improvement. ILRI, Wageningen, The Netherlands. 1974. Publication No. 19.
- CARVALHO, J.J.; AZEVEDO, C.A.V. DE; BARRETO, A.N; HERIQUE, 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.
- CARLOS SCHILARDI. Desempeño Del Riego por Superficie en el Área de Regadío de la Cuenca del Río Tunuyán Superior, Mendoza Argentina. Universidad Nacional de Cuyo. 2010. p.138
- 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.
- 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.; SKOGERBOE, G.V. Zero inertia modeling of furrow irrigation advance. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 108(IR3): 179-195, 1982.

- 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.
- LIMA FILHO, A.F. Software para avaliação da irrigação por sulcos abertos e em declive. In: Congresso Brasileiro De Engenharia Agrícola, 25. 1996. Anais... Bauru: SBEA, 1996. Resumos. p. 482.
- LÓPEZ, R.A.A. Métodos de Riego. Disponível em: <<http://www.buenastareas.com/ensayos/M%C3%A9todos-De-Riego/30749810.html>> Acesso em: 09 de julho de 2013.
- KRUSE, E.G.; HEERMANN, D.F. Implications of Irrigations System Efficiencies. Journal of Soil and Water Conservation, 32(6): 465-470. 1977.
- MERRIAM, J.L.; KELLER, J. Farm Irrigation System Evaluation; A Guide for Management. Utah State University. Logan. Usa. 1978. 271p.
- 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.
- RAYEJ, M.; WALLENDER, W.W. Furrow Irrigation Simulation Time Reduction. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 111(2): 134-146, 1985.
- REDDY, J.M.; CLYMA, W. Optimal design of furrow irrigation system. Trans. ASAE, 24(3): 617-623, 1981.
- 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.
- 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.
- 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.
- V. AMPAS¹ & E. BALTAS². Optimization of the Furrow Irrigation Efficiency. Global NEST Journal, Vol 11, No 4, pp 566-574, 2009.
- 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.
- WALKER, R.; PRESTWICH, C.; SPOFFORD, T 2006. Development of revised USDANRCS intake families for surface irrigation. Agricultural Water Management 85 (2006) 157-164.
- 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.

ESTIMATIVA DA VAZÃO MÁXIMA PELO MODELO SASIS: SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS EMPÍRICOS DA FORMA DO SULCO

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-233-9_002

¹Bianca Carolina Bernardin CATTANI,
Engenharia Agrícola e Ambiental, Graduanda, UFERSA, Mossoró-RN, biancattani@gmail.com

²Ana Beatriz Alves de ARAÚJO,
Doutora em Engenharia Agrícola e Ambiental, UFERSA, Mossoró-RN, beatrizufersa@gmail.com

⁴Roberto Vieira PORDEUS,
Dr. Prof., UFERSA, Mossoró-RN, rpordeus@ufersa.edu.br

⁵Carlos Alberto Vieira de AZEVEDO,
Dr. Prof., UFCG, Campina Grande-PB, cvieiradezevedo@gmail.com

⁶Liherberton Ferreira dos SANTOS,
Mestre em Manejo de Solo e Água., UFERSA, Mossoró-RN, liherberton@gmail.com

⁷José Dantas NETO,
Dr. Prof., UFCG, Campina Grande-PB, zedantas1955@gmail.com

ESTIMATIVA DA VAZÃO MÁXIMA PELO MODELO SASIS: SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS EMPÍRICOS DA FORMA DO SULCO

RESUMO: O modelo desenvolvido nesta pesquisa apresenta mecanismos eficazes na realização de inúmeras simulações, em uma faixa de descarga compreendida entre os valores mínimo e máximo permitidos, visando determinar a relação entre vazão e eficiência de aplicação de água, percolação profunda e taxas de escoamento e, conseqüentemente, otimizar o desempenho dos sistemas de irrigação por sulcos com fluxo contínuo. Os autores estudaram escoamento não erosivo, em função de parâmetros obtidos a partir das dimensões do sulco sendo, ρ_1 e ρ_2 os coeficientes, respectivamente, linear e exponencial, que descrevem a relação entre a área da seção transversal e altura de fluxo; desta forma, o efeito multiplicativo de ρ_1 na área da seção transversal do escoamento é linear, enquanto de ρ_2 é exponencial afetando, conseqüentemente, muito mais a vazão máxima não erosiva. Verificou-se um efeito conjugado de ρ_1 e ρ_2 no valor da $Q_{m\acute{a}x}$, ou seja, o efeito de um parâmetro depende do efeito de outro. A geometria da seção transversal de escoamento (ρ_1 e ρ_2) o mais preciso quanto possível, quando não se conhece a grandeza desta seção poderá gerar 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. Esta análise de sensibilidade também foi de grande valia para que fosse criada uma interface no software SASIS, capaz de orientar o usuário desta ferramenta na imputação de valores adaptados para ρ_1 e ρ_2 ao processo de simulação da irrigação para sulco com fluxo contínuo e da otimização do seu desempenho. Foi analisado, também, a sensibilidade da vazão máxima não erosiva na irrigação por sulco com fluxo contínuo, identificando faixas de combinações entre a rugosidade da superfície do solo e sua declividade que resultam em vazões máximas não erosivas impraticáveis, verificando-se ainda o efeito conjugado entre esses parâmetros, sendo os maiores efeitos da rugosidade.

PALAVRAS-CHAVE: Irrigação por sulcos; Simulação; Otimização.

MAXIMUM FLOW ESTIMATE FOR THE MODEL SASIS: SENSIBILITY TO THE EMPIRICAL PARAMETERS OF THE FORM OF THE FURROW

ABSTRACT: The model developed in this research presents effective mechanisms in carrying out numerous simulations, in a discharge range comprised between the minimum and maximum allowed values, aiming to determine the relationship between flow and water application efficiency, deep percolation and runoff rates and, consequently, to optimize the performance of furrow irrigation systems with continuous flow. The authors studied non-erosive flow, as a function of parameters obtained from the groove dimensions, where ρ_1 and ρ_2 are linear and exponential coefficients, respectively, which describe the relationship between cross-sectional area and flow height; in this way, the multiplicative effect of ρ_1 on the cross-sectional area of the flow is linear, while of ρ_2 it is exponential, consequently affecting the maximum non-erosive flow much more. There was a combined effect of ρ_1 and ρ_2 on the Q_{max} value, that is, the effect of one parameter depends on the effect of another. The geometry of the flow cross section (ρ_1 and ρ_2) as accurate as possible, when the magnitude of this section is not known, it may generate impractical values of Q_{max} , outside the acceptable range in the literature, which is 1.2 to 4.0 L s⁻¹. This sensitivity analysis was also of great value for the creation of an interface in the SASIS software, capable of guiding the user of this tool in imputing adapted values for ρ_1 and ρ_2 to the simulation process of furrow irrigation with continuous flow and the optimization of its performance. The sensitivity of the maximum non-erosive flow in furrow irrigation with continuous flow was also analysed, identifying ranges of combinations between the roughness of the soil surface and its slope that result in impractical maximum non-erosive flows, also verifying the combined effect among these parameters, with the greatest effects being roughness.

KEYWORDS: Furrow irrigation; Simulation; Optimization.

INTRODUÇÃO

É importante observar que a irrigação representa o uso mais intenso dos recursos hídricos, sendo responsável por aproximadamente 80% 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 necessidade de melhorar a sua eficiência.

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 da 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 à facilidade de operação, tanto com o uso de sifões como através de valas, na distribuição da água nos sulcos.

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. 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 na escolha de uma vazão muito pequena acontece o oposto.

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 ao da capacidade de infiltração básica do solo para minimizar, também, as perdas por escoamento.

Bishop et al. (1981) recomendam a equação de Gardner modificada por Criddle para se encontrar a vazão máxima, em litros por segundo, função apenas da declividade, enquanto, Walker e Skogerboe (1987) estudaram a vazão máxima não erosiva, em função de parâmetros obtidos a partir das dimensões do sulco, declividade, rugosidade e velocidade máxima não erosiva.

Diferentes modelos de simulação da irrigação por superfície foram desenvolvidos para simular um evento de irrigação isolado, assumindo-se que não existe variabilidade espacial nos parâmetros de campo (infiltração, rugosidade, declividade e seção transversal); na prática, tem-se verificado a validade desta hipótese, tendo em vista que as simulações se têm aproximado bastante das medições de campo das fases, porém, 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.

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.

Quanto a 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 (OLLITA, 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 de 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 prevalentes. Segundo Vázquez (1996a), a irrigação contínua dos 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:

$$Q_{max} = 0,631/S_o \quad (1)$$

MATERIAL E MÉTODOS

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 haver uma relação única que descreve vazão como função da área de fluxo; substituiu-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 são designados ondas cinemáticas. A designação de modelos de escoamento uniforme, também usada, se deve, como é óbvio, à fundamentação numa equação própria de escoamento uniforme.

Em virtude deste tipo de modelo não ser 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. Utilizou-se recomendações de Strelkoff e Katopodes (1977).

Assim sendo, as equações do modelo de ondas cinemáticas utilizada passam a ser:

Equação da continuidade

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (2)$$

$$Q = \alpha A^m \quad (3)$$

(Equação de Manning)

em que:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\rho_1 S_o}}{n} \quad (4)$$

$$m = \frac{\rho_2}{2} \quad (5)$$

Onde:

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

ρ_1 e ρ_2 - constantes empíricas ajustadas às medições de campo atuais da geometria do sulco;

α e m constantes empíricas.

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 e 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 1 ilustra os perfis superficial e subsuperficial de fluxo nos tempos, t_{i-1} e t_i , identificando as células que os compõem. 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:

$$x_i = \sum_{k=1}^i \delta x_k \quad (6)$$

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

Uma célula típica do perfil é ilustrada na Figura 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. Desta maneira, as variáveis subscritas 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 subscritos nas fronteiras à esquerda e à direita da célula no tempo t_i . Combinando-se as células de todos os incrementos de tempo ter-se-á uma grade de cálculo no plano (x,t) , na qual as trajetórias de avanço e recessão podem ser traçadas. 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 dessas 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.

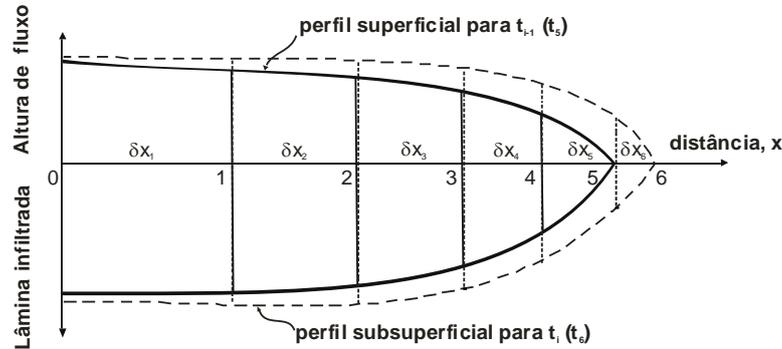


Figura 1. Esquema da progressão do fluxo superficial e da infiltração para intervalo de tempo constante. Fonte: Walker e Skogerboe (1987).

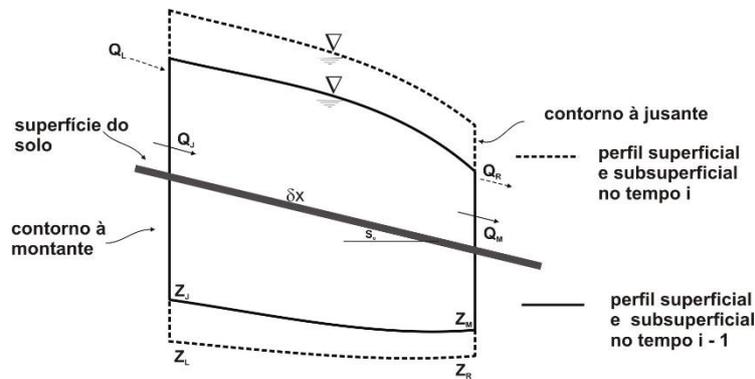


Figura 2. Célula deformada de fluxo. Fonte: Walker e Skogerboe (1987).

A forma integrada da equação da continuidade com relação a distância e ao tempo resulta em:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left[(Q_{x+\delta x, t} - Q_{x, t})_{t+\delta t} + (Q_{x+\delta x, t} - Q_{x, t})_t \right] \delta t + \\ & \frac{1}{2} \left[(A_{x, t+\delta t} - A_{x, t})_{x+\delta x} + (A_{x, t+\delta t} - A_{x, t})_x \right] \delta x + \\ & \frac{1}{2} \left[(Z_{x, t+\delta t} - Z_{x, t})_{x+\delta x} + (Z_{x, t+\delta t} - Z_{x, t})_x \right] \delta x = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

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; desta forma, uma ponderação adequada deverá estar entre $\frac{1}{2}$ a 1. Criam-se, então, os fatores θ e ϕ para ponderarem a não linearidade no perfil, respectivamente, com relação ao tempo e ao espaço. Esses fatores são extremamente importantes apenas durante a fase de avanço, porque depois desta fase ocorre tendência de se estabelecer condições estáveis de fluxo. A ponderação deve ser maior no tempo $t+\delta t$ visto que 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);

além disso, 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-se, na Equação 7, $1/2$ 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 7 pode, então, ser representada, em termos da anotação, na Figura 2, como segue:

$$\begin{aligned} & [\theta(Q_R - Q_L) + (1 - \theta)(Q_M - Q_J)]\delta t + \\ & [\phi(A_L - A_J) + (1 - \phi)(A_R - A_M)]\delta x + \\ & [\phi(Z_L - Z_J) + (1 - \phi)(Z_R - Z_M)]\delta x = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

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 8 para cada célula na malha computacional 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), 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 8 ficando esta, então, apenas com uma incógnita (A_R).

Substituindo-se a Eq. 2 na Eq. 7 e se dividindo por $\theta\alpha/\delta t$, chegar-se-á a seguinte equação não linear em A_R :

$$\begin{aligned} & A_R^m + \left(\frac{1 - \phi}{\theta\alpha}\right)\frac{\delta x}{\delta t}A_R - A_L^m + \left(\frac{1 - \theta}{\theta}\right)(A_M^m - A_J^m) + \\ & \frac{\phi}{\theta\alpha}(A_L + Z_L - A_J - Z_J)\frac{\delta x}{\delta t} + \left(\frac{1 - \phi}{\theta\alpha}\right)(Z_R - A_M - Z_M)\frac{\delta x}{\delta t} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Objetivando-se simplificar a Equação 9, isolam-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:

$$C_1 = \left(\frac{1 - \phi}{\theta\alpha}\right)\frac{\delta x}{\delta t} \quad (10)$$

e,

$$\begin{aligned} & C_2 = -A_L^m - \left(\frac{1 - \theta}{\theta}\right)A_J^{m+1} + \left(\frac{1 - \theta}{\theta}\right)A_M^{m+1} + \\ & \frac{\phi}{\alpha\theta}(A_L + Z_L - A_J - Z_J)\frac{\delta x}{\delta t} + \left(\frac{1 - \phi}{\alpha\theta}\right)(Z_R - A_M - Z_M)\frac{\delta x}{\delta t} \end{aligned} \quad (11)$$

chegando-se à equação

$$A_R^{m+1} + C_1A_R + C_2 = 0 \quad (12)$$

A Eq. 12 é utilizada para células interiores e para a primeira célula, depois da primeira etapa de cálculo. Uma vez que a Eq.12 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)

Equação de infiltração d'água foi obtida pela equação:

$$Z = k\tau^a + f_o\tau \quad (13)$$

Onde:

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;

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

A vazão máxima não erosiva foi obtida pela seguinte equação:

$$Q_{m\acute{a}x} = \left[\left(\frac{V_{m\acute{a}x}^{\rho_2} n^2}{3600 S_o \rho_1} \right)^{\frac{1}{\rho_2-2}} \right] \quad (14)$$

Onde:

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

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

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

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

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

O volume infiltrado foi determinado usando a regra trapezoidal pela equação:

$$V_z = \frac{L}{2n} [Z_o + (2Z_1 + 2Z_2 + \dots + 2Z_{n-1}) + Z_n] \quad (15)$$

Onde:

L - comprimento da área, m;

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

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

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

$$Z_i = k[t_r - (t_a)_i]^a + f_o[t_r - (t_a)_i] \quad (16)$$

Onde:

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

a - constante empírica da equação de Kostiakov-Lewis;

f_0 - taxa de infiltração básica, $m^3 m^{-1} \text{ min}^{-1}$;

t_r - tempo de recessão, min, $(t_a)_i$ - 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 16.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise de sensibilidade estão apresentados na Tabela 1 e na Figura 3, processada através do software SUFER 7. Ocorreram grandes variações na vazão máxima não erosiva ($Q_{m\acute{a}x}$) além de 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, $Q_{m\acute{a}x}$ diminuiu 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 , $Q_{m\acute{a}x}$ diminuiu 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 $L s^{-1}$ (acréscimo 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 oposto 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 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 e Skogerboe (1987), ρ_1 está como 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; desta 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 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 o 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 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 desta 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 1 exhibe, 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 (1956) 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, ter-se-á 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 e Skogerboe (1987), utilizada nesta pesquisa, leva vantagem sobre a equação de Criddle (1956), porque o grau de empirismo nela é menor, uma vez que, além da declividade, ela 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 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.

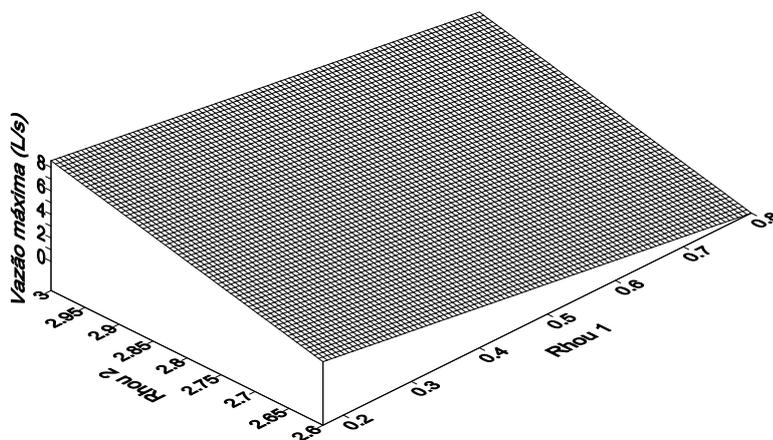


Figura 3. Sensibilidade do prognóstico da vazão máxima não erosiva na irrigação por sulco com fluxo contínuo aos parâmetros empíricos da forma do sulco (ρ_1) e (ρ_2), para os dados de campo AMALGACQ.

Tabela 1. 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 $S_0 = 0,0066 \text{ m m}^{-1}$, 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

Os resultados da análise de sensibilidade relacionados à rugosidade e declividade estão apresentados na Tabela 2 e na Figura 4, processada através do software SUFER 7. Observa-se que ocorreram variações acentuadas na vazão máxima não erosiva ($Q_{máx}$) em relação à rugosidade (n) e à 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 $Q_{máx}$ 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, $Q_{máx}$ 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 oscilou de $0,001$ para $0,021 \text{ m m}^{-1}$, a vazão máxima não erosiva diminuiu de $1,26$ para $0,06 \text{ L s}^{-1}$ (diminuição de $1,20 \text{ L s}^{-1}$); entretanto, para a rugosidade de $0,0477 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$, nesta faixa de variação da declividade a vazão máxima não erosiva diminuiu de $30,48$ para $1,36 \text{ L s}^{-1}$ (diminuição de $29,12 \text{ L s}^{-1}$). Constata-se, então, haver um efeito conjugado de n e S_o no valor de $Q_{máx}$, ou seja, o efeito de um parâmetro depende do efeito do outro. O maior valor para $Q_{máx}$ ($30,48 \text{ L s}^{-1}$) ocorreu para a maior rugosidade e a menor declividade, acontecendo o inverso para o menor valor para $Q_{máx}$ ($0,06 \text{ L s}^{-1}$); verifica-se então que a rugosidade exerce efeito bem maior na vazão máxima não erosiva que a declividade e que, para qualquer valor de S_o , quando n aumenta $Q_{máx}$ também aumenta; já para qualquer valor de n , $Q_{máx}$ diminui com o aumento na S_o , fato este explicado de vez que na equação da vazão máxima não erosiva proposta por Walker & Skogerboe (1987), S_o está como divisor da velocidade máxima não erosiva da água ($V_{máx}$), enquanto n , além ser um fator multiplicativo de $V_{máx}$, está elevado ao quadrado; por isto, $Q_{máx}$ 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, detectaram-se combinações entre esses parâmetros, que geram vazões máximas não erosivas impraticáveis, por serem tanto muito pequenas como grandes demais. Em termos práticos, $Q_{máx}$ deve ser superior à vazão mínima, isto é, aquela que garante que a água avançará até o 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 se torna impraticável devido à disponibilidade de certo volume de água por período insuficiente para possibilitar a utilização de uma vazão máxima não erosiva.

Os resultados desta pesquisa demonstram a necessidade de especial atenção na estimativa da rugosidade da superfície do solo, a qual deve ser a mais precisa possível, vez que poderá, até tornar-se limitação de uso de uma vazão máxima não erosiva, em virtude de resultar em valores impraticáveis de $Q_{máx}$, fora da faixa aceitável na literatura, que é de $1,2$ a $4,0 \text{ L s}^{-1}$. Walker & Skogerboe (1987) recomendam, para áreas lisas e previamente irrigadas, para terrenos recentemente preparados e para condições de campo em que a densidade da cultura obstrui o movimento d'água, respectivamente, valores para n iguais a $0,02$, $0,04$ e $0,15$. A Tabela 2 exhibe, em negrito, as combinações entre S_o e n que resultam em $Q_{máx}$ 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 et al. (1956) apud Bernardo (1995), propôs a Equação 1 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 et al. (1956), porque seu grau de empirismo é menor, uma vez que, além da declividade, ela 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 $4,0 \text{ L s}^{-1}$, enquanto para a declividade máxima ($5,0$ por mil) é de $1,3 \text{ L s}^{-1}$. 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.

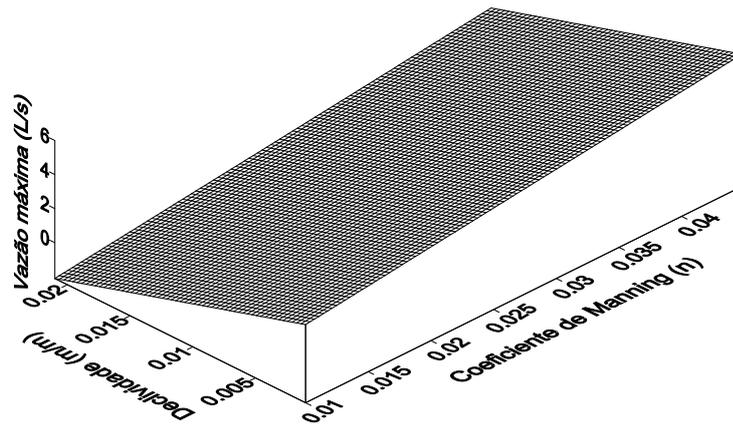


Figura 4. Sensibilidade do prognóstico da vazão máxima não erosiva na irrigação por sulco com fluxo contínuo aos parâmetros de campo rugosidade (n) e declividade (S_0), para os dados de campo AMALGAC

Tabela 2. 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_0), 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

CONCLUSÃO

- 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 ;
- Na 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 às perdas por percolação, a ponto de se tornarem dominantes, para as condições de campo estudadas, os melhores índices de eficiência de aplicação d'água foram obtidos para vazões próximas da vazão mínima, para condições de irrigação adequada;
- 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.

REFERÊNCIAS

- BASSETT, D.L.; FANGMEIER, D.D.; STRELKOFF, T. Hydraulics of Surface Irrigation. In: Design and Operation of Farm Irrigation Systems. ASAE. Monograph n° 3, p.447-498. 1983. BERNARDO, S. Manual de irrigação. 6.ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1995, 657p.
- 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.
- 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. 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.
- CRIDDLE, W.D.; DAVIS, S.; PAIR, C.H.; SHOCKLEY, D.C. Methods for evaluating systems. Washington, USDA, Soil Conservation Service, 1956. 24p. (Agriculture Handbook n° 82)
- DAKER, Irrigação e Drenagem. ed.7. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1988. 543p. (A água na agricultura, v3).
- OLITTA, A.F.L. Os métodos de irrigação. 11.ed. São Paulo: Nobel; 1984. 267p.
- 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.
- STRELKOFF, T.; KATOPODES, N.D. End Depth Under Zero-Inertia Conditions. Journal of the Hydraulics Division. ASCE, 103(HY1): 699-611, 1977.
- VÁZQUEZ, E. Método simplificado para determinar el gasto óptimo y el tiempo de riego al aplicar riego continuo con surcos cerrados. In: XVII Congreso Latino Americano de Hidráulica. Guayaquil, Equador, v.5, p.353-363, 1996a. 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. *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.

SIMULAÇÃO E PROGNÓSTICO DO DESEMPENHO DA IRRIGAÇÃO SOFTWARE APLICADO À SIMULAÇÃO DE IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE (SASIS)

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-233-9_003

¹Bianca Carolina Bernardin CATTANI,
Engenharia Agrícola e Ambiental, Graduanda, UFERSA, Mossoró-RN, biancattani@gmail.com

²Ana Beatriz Alves de ARAÚJO,
Doutora em Engenharia Agrícola e Ambiental, UFERSA, Mossoró-RN, beatrizufersa@gmail.com

³Samara Nascimento de LIMA
Engenharia Agrícola e Ambiental, Graduanda, UFERSA, Mossoró-RN, samaraleng@gmail.com

⁴Luis Antônio DANTAS,
Programador, UFCG, Campina Grande-PB, dantasluisinho@gmail.com

⁵Roberto Vieira PORDEUS,
Dr. Prof., UFERSA, Mossoró-RN, rpordeus@ufersa.edu.br

⁶Carlos Alberto Vieira de AZEVEDO,
Dr. Prof., UFCG, Campina Grande-PB, cvieiradeazevedo@gmail.com

⁷José Espínola SOBRINHO,
Dr. Prof., UFERSA, Mossoró-RN, jespínola@ufersa.edu.br

SIMULAÇÃO E PROGNÓSTICO DO DESEMPENHO DA IRRIGAÇÃO SOFTWARE APLICADO À SIMULAÇÃO DE IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE (SASIS)

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, em geral, do dimensionamento e manejo inadequados. Assim sendo objetivou-se, com esta pesquisa 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. As simulações da fase de avanço foram realizadas pelo modelo de ondas cinemáticas, implementado nesta pesquisa com base no desenvolvimento teórico apresentado por Walker e Humpherys (1983). O modelo proposto, escrito na linguagem de programação DELPHI 5.0 e denominado SASIS, “Software Aplicado à Simulação da Irrigação por Superfície”, teve sua validação testada para diferentes condições de campo. Os resultados desta pesquisa mostram a necessidade da otimização no sistema de irrigação por sulco com fluxo contínuo. O modelo desenvolvido nesta pesquisa apresenta mecanismos eficazes na realização de inúmeras simulações, da fase de avanço, numa faixa de vazão compreendida entre a mínima e a máxima permitidas, objetivando-se otimizar o desempenho do sistema de irrigação por sulco com fluxo contínuo.

PALAVRAS-CHAVE: Irrigação por sulco; Simulação; Otimização.

SASIS-VALIDATION OF THE SIMULATION OF THE 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. 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 e Humpherys (1983). 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 of this research show the need of the optimization in the furrow irrigation systems with continuous flow. 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, being aimed at to optimize the acting of the overhead irrigation for furrow with continuous flow.

KEYWORDS: Furrow irrigation; Simulation; Optimization.

INTRODUÇÃO

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 da 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 à 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 considerar essas variáveis e as interações entre elas (WU e LIANG, 1970; REDDY e CLYMA, 1981).

Com ajuda dos computadores, vem-se desenvolvendo modelos matemáticos para simular as fases da irrigação por superfície, levando-se em consideração, tanto no dimensionamento como no manejo desses sistemas, as diferentes interações entre as variáveis de campo e operacionais. Deferidos modelos são capazes de prever a eficiência desses sistemas, facilitando aos projetistas tomadas de decisão 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.

A simulação matemática 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 e KATOPODES, 1977; ELLIOTT et al., 1982; WALKER e HUMPHERYS, 1983; STRELKOFF e SOUZA, 1984; RAYEJ e WALLENDER, 1985, AZEVEDO, 1992) e tais 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 simplificadoras; zero inércia, baseia-se também nessas equações, negligenciando, porém, na equação do movimento, os termos inerciais; e onda cinemática, que se baseia 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 e 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 e KATOPODES, 1977; RAYEJ e 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-se que não existe variabilidade espacial nos parâmetros de campo (infiltração, rugosidade, declividade e seção transversal); na prática, tem-se verificado a validade desta hipótese, tendo em vista que as simulações se têm aproximado bastante das medições de campo das fases, porém, 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.

Objetivou-se, através desta pesquisa, desenvolver um modelo matemático computacional de simulação da irrigação por sulco com fluxo contínuo, capaz de, através de simulações da fase de avanço, prognosticar o desempenho de um evento de irrigação por sulco com fluxo contínuo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Desenvolvimento teórico do modelo

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 haver uma relação única que descreve vazão como função da área de fluxo; substituiu-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 são designados ondas cinemáticas. A designação de modelos de escoamento uniforme, também usada, se deve, como é óbvio, à fundamentação numa equação própria de escoamento uniforme.

O modelo de ondas cinemáticas implementado nesta pesquisa baseou-se num desenvolvimento teórico apresentado por Walker e Humpherys (1983). A equação da Continuidade e de Manning são descritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (1)$$

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

Onde:

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

t - o tempo de ocorrência, s;

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

τ - tempo de oportunidade de infiltração, s;

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

R é o 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:

$$y = \sigma_1 A^{\sigma_2} \quad (3)$$

e,

$$A^2 R^{1,33} = \rho_1 A^{\rho_2} \quad (4)$$

Onde:

y - altura de fluxo no sulco, m;

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

R - respectivo raio hidráulico, m;

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 e outra.

Usando-se a relação da Equação 3, a equação de Manning se tornará:

$$Q = \alpha A^m \quad (5)$$

em que:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\rho_1 S_o}}{n} \quad (6)$$

$$m = \frac{\rho_2}{2} \quad (7)$$

Onde:

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

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

ρ_1 e ρ_2 - constantes empíricas ajustadas às medições de campo atuais da geometria do sulco;

α e m constantes empíricas.

Solução numérica do modelo

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 e Humpherys (1983) e Wallender (1986), o qual resulta em duas equações algébricas mais estáveis e mais fáceis de serem resolvidas em microcomputadores.

Para se obter a forma integrada da equação da continuidade (Equação 1), primeiro se integra analiticamente, com relação à distância e depois numericamente, com relação ao tempo. Tem-se, então:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left(\int_x^{x+\Delta x} \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) dt + \int_x^{x+\Delta x} \left(\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial A}{\partial t} dt \right) dx + \int_x^{x+\Delta x} \left(\int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial Z}{\partial \tau} dt \right) dx = 0 \quad (8)$$

em que a primeira integração resulta em:

$$\int_t^{t+\delta t} [Q(x+\delta x, t) - Q(x, t)] dt + \int_x^{x+\delta x} [A(x, t+\delta t) - A(x, t)] dx + \int_x^{x+\delta x} [Z(x, t+\delta t) - Z(x, t)] dx = 0 \quad (9)$$

e a segunda integração em:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left[(Q_{x+\delta x, t+\delta t} - Q_{x, t+\delta t}) + (Q_{x+\delta x, t} - Q_{x, t}) \right] \delta t + \\ & \frac{1}{2} \left[(A_{x, t+\delta t} - A_{x, t})_{x+\delta x} + (A_{x, t+\delta t} - A_{x, t})_x \right] \delta x + \\ & \frac{1}{2} \left[(Z_{x, t+\delta t} - Z_{x, t})_{x+\delta x} + (Z_{x, t+\delta t} - Z_{x, t})_x \right] \delta x = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Walker e Humpherys (1983) desenvolveram os conceitos da Equação 1, considerando o incremento do volume deformável d'água no sistema de fluxo correspondente a determinado período. Uma célula típica do perfil é ilustrada na Figura 1, 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. Desta maneira, as variáveis subscritas 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 subscritos nas fronteiras à esquerda e à direita da célula no tempo t_i . Combinando-se as células de todos os incrementos de tempo ter-se-á uma grade de cálculo no plano (x, t) , na qual as trajetórias de avanço e recessão podem ser traçadas (Figura 2).

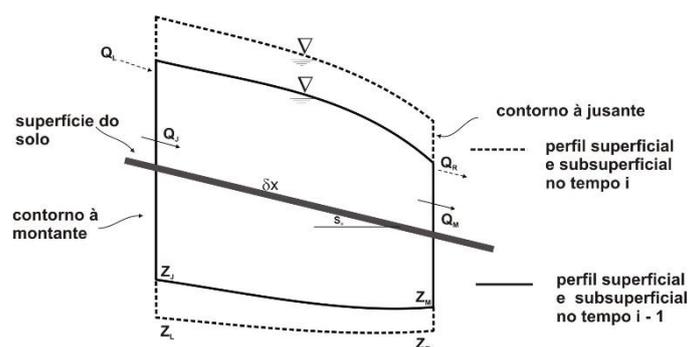


Figura 1. Célula deformada de fluxo (WALKER e SKORGEBOE, 1987)

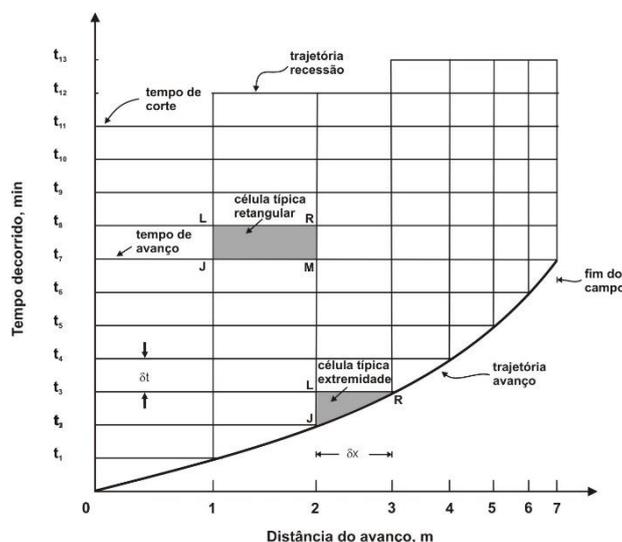


Figura 2. Malha computacional (WALKER, 2001)

Substituindo-se, na Equação 10, $1/2$ 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 10 pode, então, ser representada, em termos da anotação, na Figura 2, como segue:

$$\begin{aligned} & [\theta(Q_R - Q_L) + (1 - \theta)(Q_M - Q_J)]\delta t + \\ & [\phi(A_L - A_J) + (1 - \phi)(A_R - A_M)]\delta x + \\ & [\phi(Z_L - Z_J) + (1 - \phi)(Z_R - Z_M)]\delta x = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

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 11 para cada célula na malha computacional (Figura 2) 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 5), não se o considera uma incógnita; o mesmo caso é aplicado a Z (infiltração) o qual está sendo calculado pela equação de Kostikov-Lewis; o que se faz é substituir as equações de Q e Z na Equação 11 ficando esta, então, apenas com uma incógnita (A_R).

Substituindo-se a Eq. 5 na Eq. 11 e se dividindo por $\theta\alpha/\delta t$, chegar-se-á à seguinte equação não linear em A_R :

$$\begin{aligned} & A_R^m + \left(\frac{1 - \phi}{\theta\alpha}\right)\frac{\delta x}{\delta t}A_R - A_L^m + \left(\frac{1 - \theta}{\theta}\right)(A_M^m - A_J^m) + \\ & \frac{\phi}{\theta\alpha}(A_L + Z_L - A_J - Z_J)\frac{\delta x}{\delta t} + \left(\frac{1 - \phi}{\theta\alpha}\right)(Z_R - A_M - Z_M)\frac{\delta x}{\delta t} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Objetivando-se simplificar a Equação 12, isolam-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:

$$C_1 = \left(\frac{1 - \phi}{\theta\alpha}\right)\frac{\delta x}{\delta t} \quad (13)$$

e,

$$\begin{aligned} & C_2 = -A_L^m - \left(\frac{1 - \theta}{\theta}\right)A_J^{m+1} + \left(\frac{1 - \theta}{\theta}\right)A_M^{m+1} + \\ & \frac{\phi}{\alpha\theta}(A_L + Z_L - A_J - Z_J)\frac{\delta x}{\delta t} + \left(\frac{1 - \phi}{\alpha\theta}\right)(Z_R - A_M - Z_M)\frac{\delta x}{\delta t} \end{aligned} \quad (14)$$

chegando-se à equação

$$A_R^{m+1} + C_1A_R + C_2 = 0 \quad (15)$$

A Eq. 15 é utilizada para células interiores e para a primeira célula, depois da primeira etapa de cálculo. Uma vez que a Eq. 15 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. 5)

Condições iniciais

As Equações 13 a 15 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 13 a 15, se reduz a:

$$-A_L^m + \frac{\phi}{\alpha\theta} (A_L + Z_L) \frac{\delta x_1}{\delta t} = 0 \quad (\text{célula ponta}) \quad (16)$$

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); desta forma, a Equação 16 se reduz a:

$$\delta x_1 = \frac{\theta \alpha A_L^m \delta t}{\phi (A_L + Z_L)} \quad (17)$$

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.

Condições de contorno

Os sistemas de irrigação por superfície têm 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 limitadas 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 usá-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 $0 < t < t_{ap}$. As condições de fluxo no contorno à jusante são descritas pelas Equações 5 e 17, 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 5).

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 um conjunto de dados (KWF-Kimberly Wheel Furrow) publicados por Walker e Skogerboe (1987). Esses conjuntos de dados (Tabela 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 2).

Tabela 1. Dados de campo utilizados na validação do modelo SASIS.

Dados de Campo	PISG1	PISG2	PISG3	PISG4	KWF	AMALGACQ	GUFCQ
----------------	-------	-------	-------	-------	-----	----------	-------

Tipo de Solo	Franco argilo arenoso	Franco argilo arenoso	Franco arenoso	Franco argilo arenoso	Franco silte argiloso	Silte argiloso	Silte arenoso
Vazão (L s ⁻¹)	1,33*	1,47*	1,54*	1,13*	1,50**	1,80**	1,30**
Comprimento do sulco (m)	67	84	70	115	360	403	217
Declividade (m m ⁻¹)	0,0030	0,0016	0,0043	0,0024	0,0104	0,0066	0,0173
Coefficiente de Manning, n (m ^{-1/3} s)	0,020	0,020	0,025	0,020	0,013	0,013	0,013
Parâmetro da Seção, ρ_1	0,291	0,185	0,532	0,339	0,730	0,730	0,730
Parâmetro da Seção, ρ_2	2,847	2,766	2,840	2,806	2,980	2,980	2,980
k (m ³ m ^{-a} m ⁻¹)	0,03781	0,02931	0,01024	0,0054	0,0088	0,00182	0,00896
a	0,165	0,302	0,326	0,412	0,533	0,234	0,0
f_0 (m ³ min ⁻¹ m ⁻¹)	0,000186	0,000186	0,000264	0,000186	0,00017	0,00019	0,000022
Z_{req} (m)	0,090	0,060	0,020	0,020	0,090	0,090	0,050

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

Tabela 2. Dados de avanço d'água medido em campo e utilizados na validação do modelo SASIS

PISG1		PISG2		PISG3		PISG4		KWF		AMALGACQ		GUFQC	
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 e Skogerboe (1989); AMALGACQ e GUFQC: publicada por Azevedo (1992), empregada na demonstração do modelo SIRTOM; XA: distância de avanço d'água medido em campo, m; TA: tempo de avanço, min.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

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 3 exibindo, de forma relativamente simplificada, o algoritmo do software SASIS.

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 e Skogerboe (1987) e utilizada no software SIRMORD III de Walker (2001). A simulação 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-se a combinação entre os parâmetros operacionais (vazão e tempo de aplicação d'água) para avaliar o desempenho da irrigação.

O modelo proposto nesta pesquisa, denominado SASIS (Software Aplicado à Simulação de Irrigação por Superfície), desenvolvido para simular a fase de avanço na irrigação superficial, 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.

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 distribuição absoluta.

O SASIS é um software autoexplicativo, orientado a objetos, escrito para sistemas de microcomputadores compatíveis com o IBM, utilizando Windows 98, 2000, MILENIUM, XP, e sistemas operacionais subsequentes. 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 o 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.

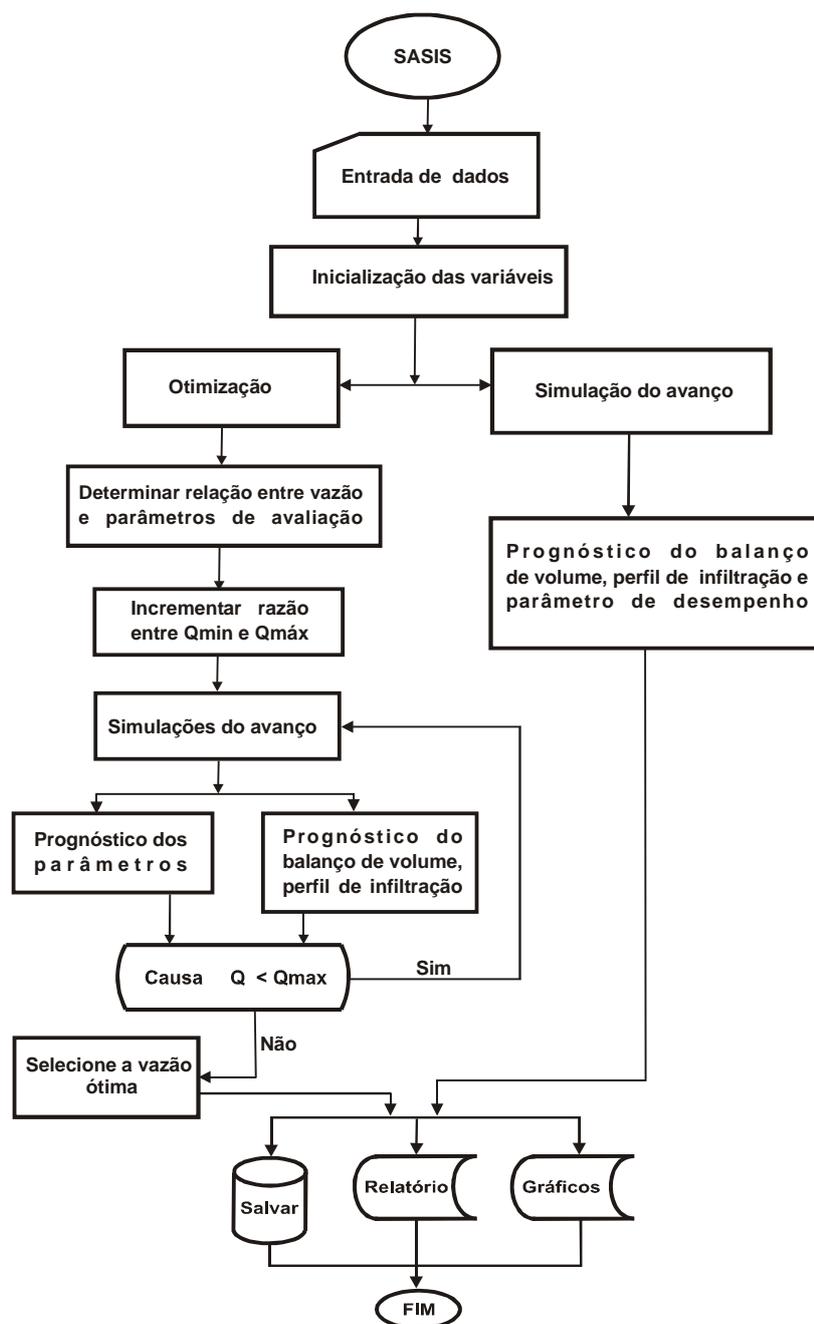


Figura 3. Fluxograma da sequência de operacionalização do programa computacional do software SASIS

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); 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.

Operação do Sistema

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). 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.

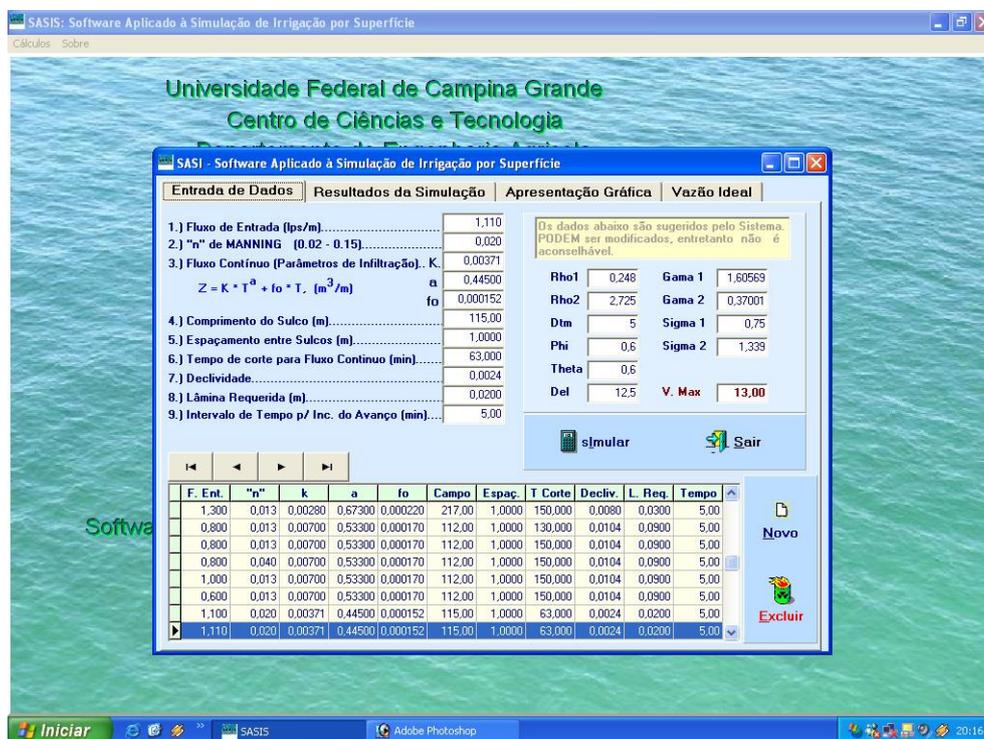


Figura 4. Tela de inserção de dados de campo para a simulação da irrigação por sulco com fluxo contínuo.

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.

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 **N**ovo, em que se tem a opção **E**xcluir e **S**air; as outras três janelas: Resultado da Simulação, Apresentação Gráfica e Vazão Ideal, podem ser acessadas com um simples click no ícone escolhido

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 5).

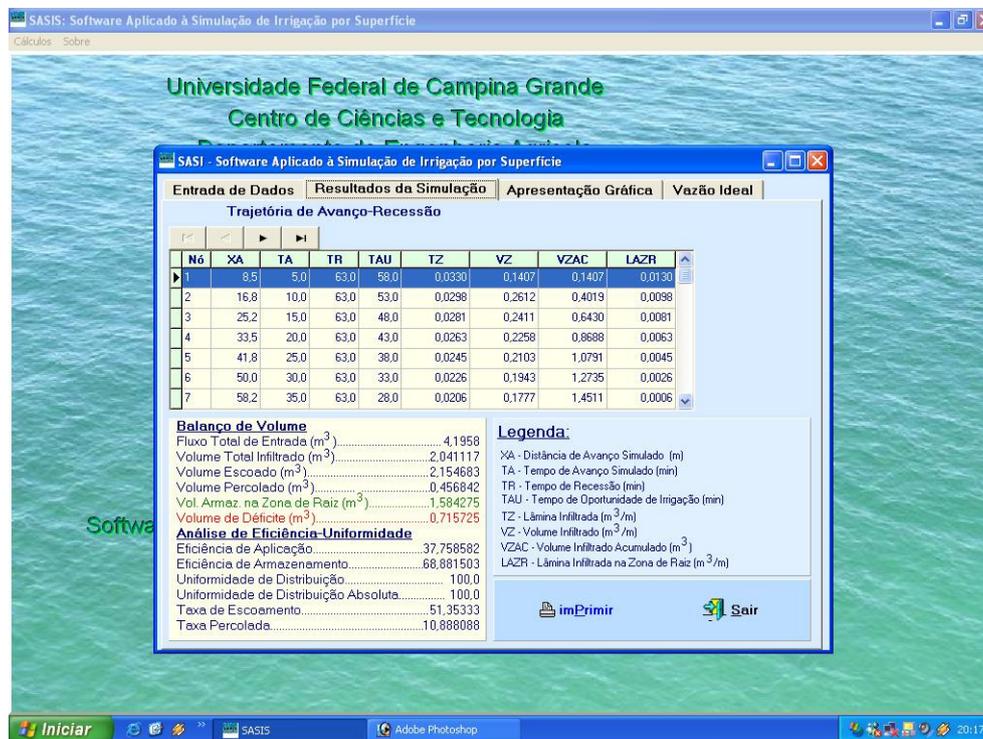


Figura 5. Tela exibindo os resultados da simulação do software SASIS.

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 **im**primir, 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 se encontram 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 6 e 7).

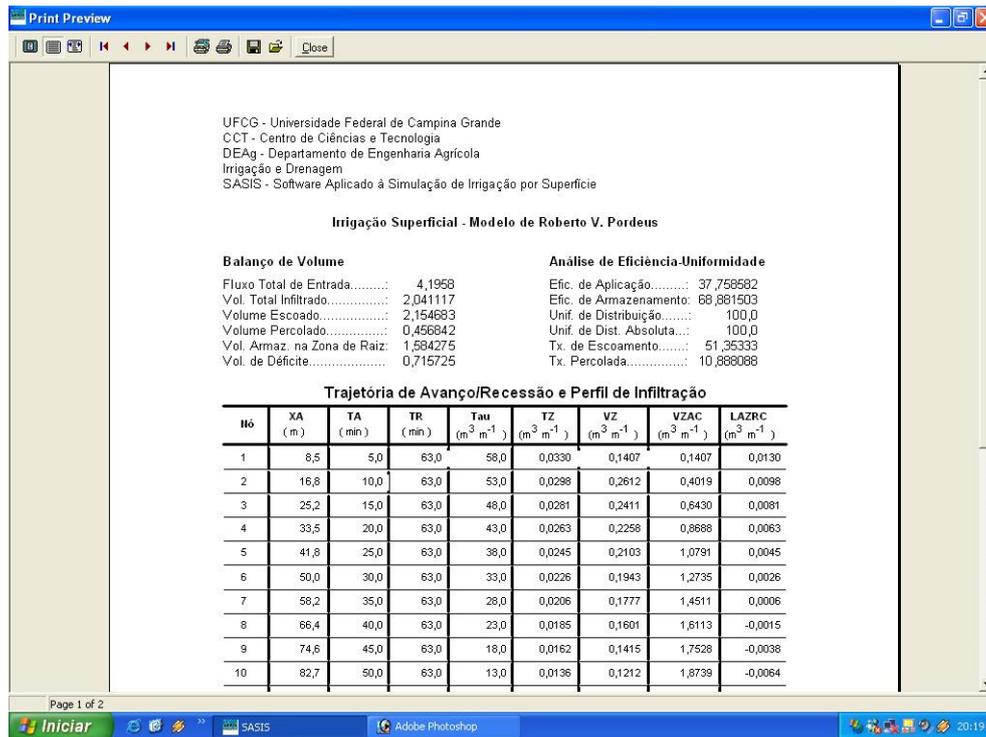


Figura 6. Tela de visualização da primeira página de um relatório dos dados da simulação da irrigação por sulco com fluxo contínuo e do prognóstico de sua performance.

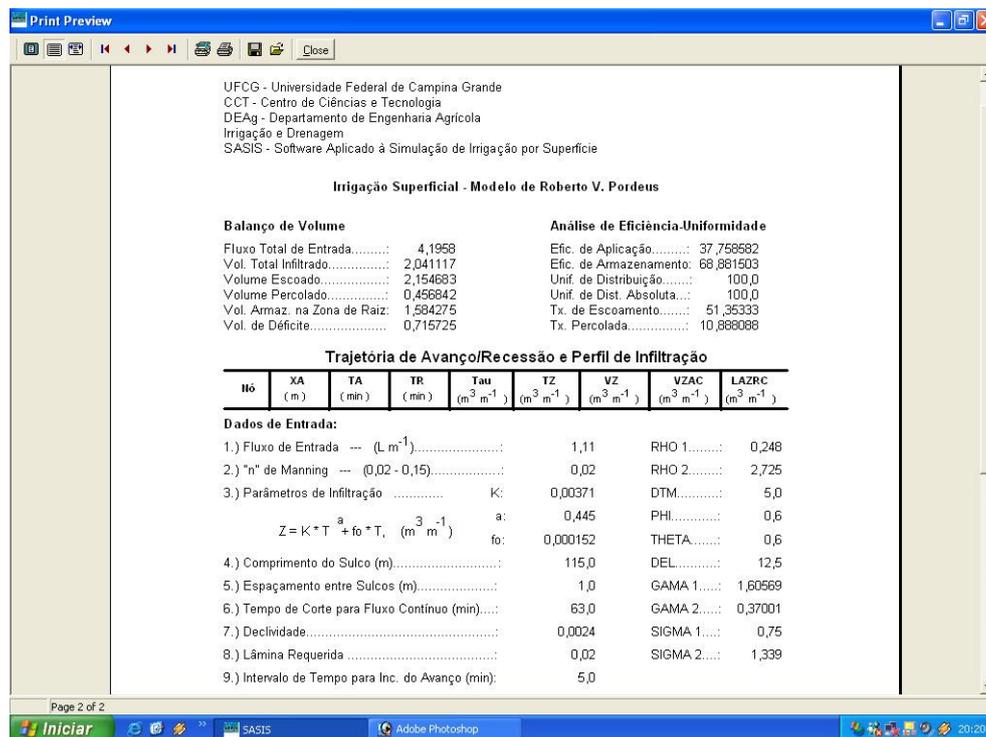


Figura 7. Tela de visualização da segunda página de um relatório dos dados da simulação da irrigação por sulco com fluxo contínuo e do prognóstico de sua performance.

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 9); para visualizar na tela o gráfico do perfil infiltrado, clica-se no ícone Lâmina (Figura 10) 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 encontram na parte superior da tela (Figura 11). 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 8).

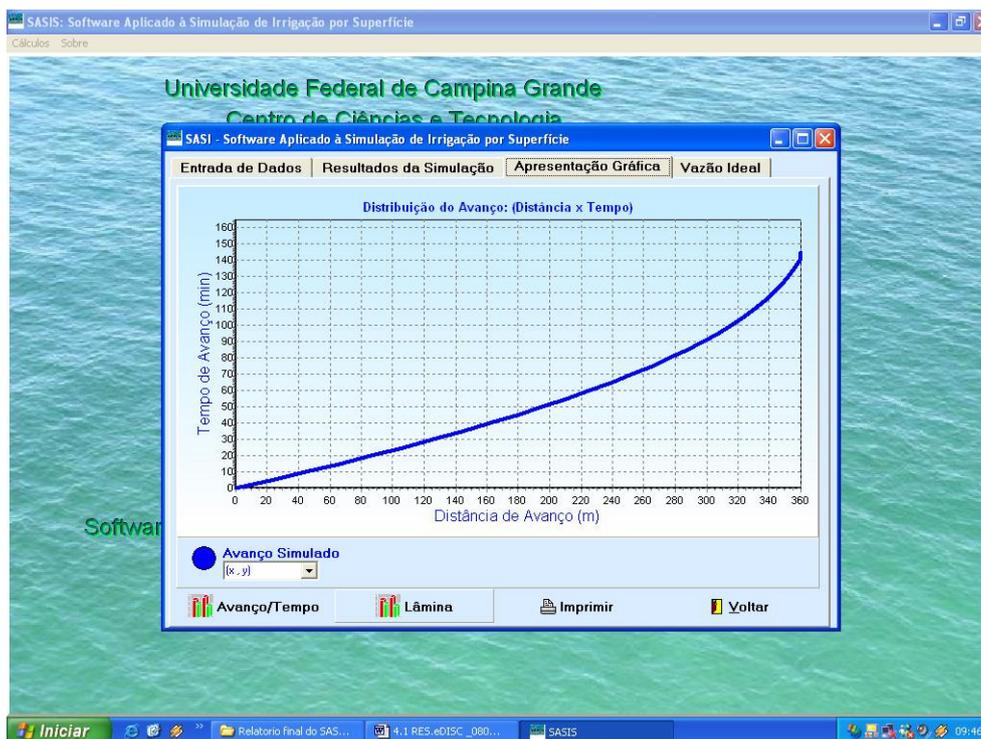


Figura 8. Tela de visualização da trajetória de avanço da água ao longo do sulco.

A tela de lâmina é ilustrada conforme apresentado na Figura 9. 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 se 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.

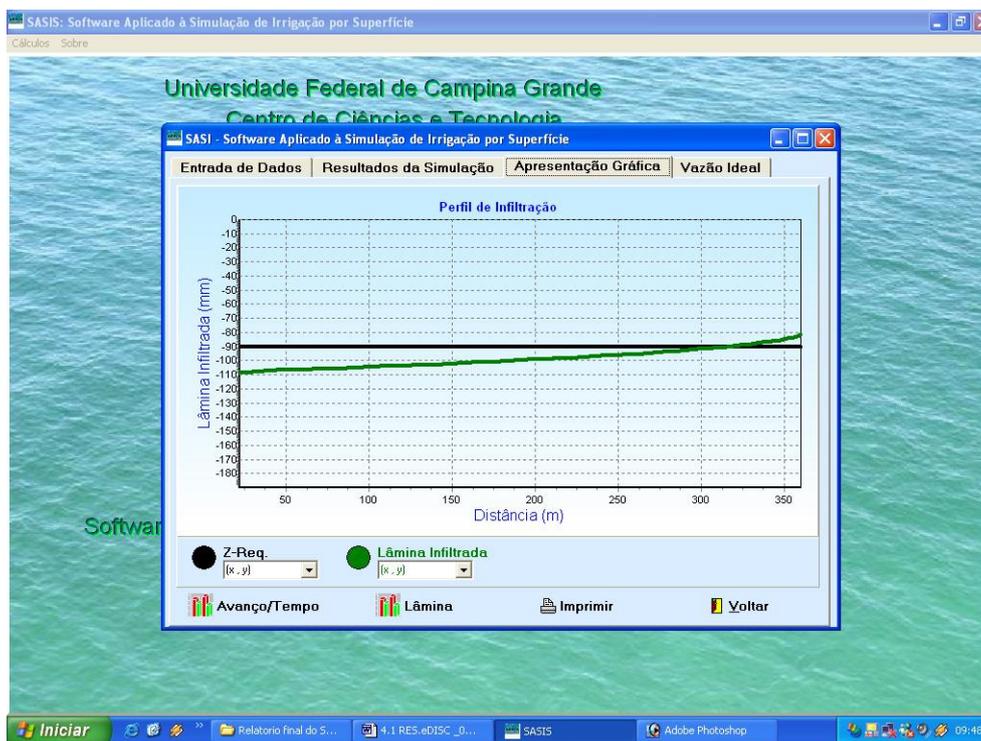


Figura 9. Tela de visualização do perfil de infiltração da água no solo em irrigação por sulco com fluxo contínuo.

Na tela da Figura 9 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.

CONCLUSÃO

- 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 nem dos parâmetros de desempenho do sistema de irrigação por sulco com fluxo contínuo;
- 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;
- 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.

REFERÊNCIAS

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, Logon, Utah, USA, 263p. 1992.

- 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. 200 ASAE Annual International Meeting, Sacramento, California, USA, paper n. 012165 p.1-13, 2001.
- BURT, C.M.; CLEMMENS, A.J.; STRELKOFF, T.S.; SOLOMON, K.H.; BLIESNER, R.D.; HARDY, L.A.; HOWELL, T.A. EISENHAURER, D.E. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 123(IR6): 423-442. 1997.
- 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.
- 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.
- 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.
- REDDY, J.M.; CLYMA, W. Optimal design of furrow irrigation system. *Trans. ASAE*, 24(3): 617-623, 1981.
- 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.
- 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.
- VALIANTZAS, J.D. Explicit time of advance formula for furrow desing. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Davis, v.125, n.1, 1999.
- 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.
- 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.

PROGNÓSTICO DO BALANÇO DE VOLUME D'ÁGUA NA IRRIGAÇÃO POR SULCO PELOS MODELOS SASIS E SIRMOD¹

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-233-9_004

¹Ana Beatriz Alves de ARAÚJO,
Doutora em Engenharia Agrícola e Ambiental, UFERSA, Mossoró-RN, beatrizufersa@gmail.com

²Bianca Carolina Bernardin CATTANI,
Engenharia Agrícola e Ambiental, Graduanda, UFERSA, Mossoró-RN, biancattani@gmail.com

³Roberto Vieira PORDEUS,
Dr. Prof., UFERSA, Mossoró-RN, rpordeus@ufersa.edu.br

⁴Carlos Alberto Vieira de AZEVEDO,
Dr. Prof., UFCG, Campina Grande-PB, cvieiradezevedo@gmail.com

⁵Luiz Antônio DANTAS,
Programador, UFCG, Campina Grande-PB, dantasluisinho@gmail.com

⁶Márcia Rejane de Queiroz Almeida AZEVEDO,
Dra. Profa., UEPB, Lagoa Seca-PB, marciarqaa@ibest.com.br

⁷José Espínola SOBRINHO,
Dr. Prof. UFERSA, Mossoró-RN, jespínola@ufersa.edu.br

¹ Trabalho extraído da Tese de doutorado do primeiro autor, apresentado na Universidade Federal de Campina Grande-PB.

PROGNÓSTICO DO BALANÇO DE VOLUME D'ÁGUA NA IRRIGAÇÃO POR SULCO PELOS MODELOS SASIS E SIRMOD

RESUMO: Objetivou-se, com esta pesquisa 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. Os resultados demonstraram que a vazão aplicada exerce influência decisiva nos parâmetros de desempenho do sistema de irrigação, tendo os melhores desempenhos ocorrido 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.

PALAVRAS-CHAVE: Irrigação por sulco, simulação, otimização

PREDICTION OF THE SWINGING OF VOLUME WATER IN THE IRRIGATION FOR FURROW FOR THE MODELS SASIS AND SIRMOD

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 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 do not 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.

KEYWORDS: Furrow Irrigation, simulation, optimization

INTRODUÇÃO

É importante observar que a irrigação representa o uso mais intenso dos recursos hídricos, sendo responsável por aproximadamente 80% 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 necessidade de melhorar a sua eficiência.

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.

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.

MATERIAL E METÓDOS

Desenvolvimento teórico do modelo de ondas cinemáticas

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 haver uma relação única que descreve vazão como função da área de fluxo; substituiu-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 são designados ondas cinemáticas. A designação de modelos de escoamento uniforme, também usada, se deve, 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

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (1)$$

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

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_o - declividade do campo, $m m^{-1}$

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:

$$y = \sigma_1 A^{\sigma_2} \quad (3)$$

$$e \quad A^2 R^{1,33} = \rho_1 A^{\rho_2} \quad (4)$$

donde: y - altura de fluxo no sulco, m

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

R - respectivo raio hidráulico, m

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 e outra.

A hipótese descrita garante 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 4, chega-se a:

$$S_0 = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{1,33}} = \frac{Q^2 n^2}{\rho_1 A^{\rho_2}} \quad (3.5/5)$$

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_0 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 (3.4.1), seguindo-se uma cadeia de transformações que, afinal, compõem o desenvolvimento do modelo (Walker & Humpherys, 1983).

Em virtude das Equações 2 e 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_0 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, a equação de Manning se tornará:

$$Q = \alpha A^m \quad (6)$$

em que:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\rho_1 S_0}}{n} \quad (7)$$

$$m = \frac{\rho_2}{2} \quad (8)$$

sendo n o coeficiente de rugosidade de Manning em $m^{-1/3} s$, S_0 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.

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 em um evento de irrigação. A deformação mais acentuada do perfil superficial de fluxo ocorre nas regiões de contorno do sistema. A solução dessas equações pode ser baseada considerando-se que a maior deformação ocorre 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 se considerando, na seção de saída, as células se tornam 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, apresentados 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 1 ilustra os

perfis superficial e subsuperficial de fluxo nos tempos, t_{i-1} e t_i , identificando as células que os compõem. 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:

$$x_i = \sum_{k=1}^i \delta x_k \quad (9)$$

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

Uma célula típica do perfil é ilustrada na Figura 3-2 1, 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. Desta maneira, as variáveis subscritas 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 subscritos nas fronteiras à esquerda e à direita da célula no tempo t_i . Combinando-se as células de todos os incrementos de tempo ter-se-á uma grade de cálculo no plano (x,t) , na qual as trajetórias de avanço e recessão podem ser traçadas (Figura 3-3 2). 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 dessas 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.

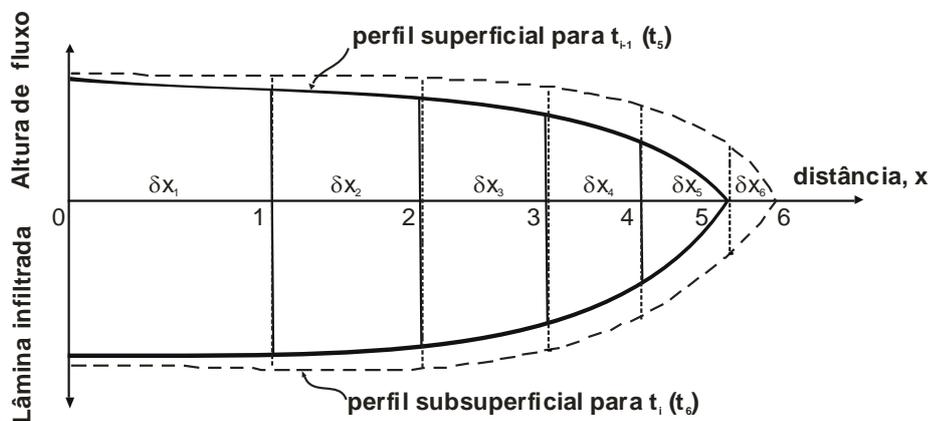


Figura 1. Esquema da progressão do fluxo superficial e da infiltração para intervalo de tempo constante

FONTE: WALKER & SKOGERBOE (1987)

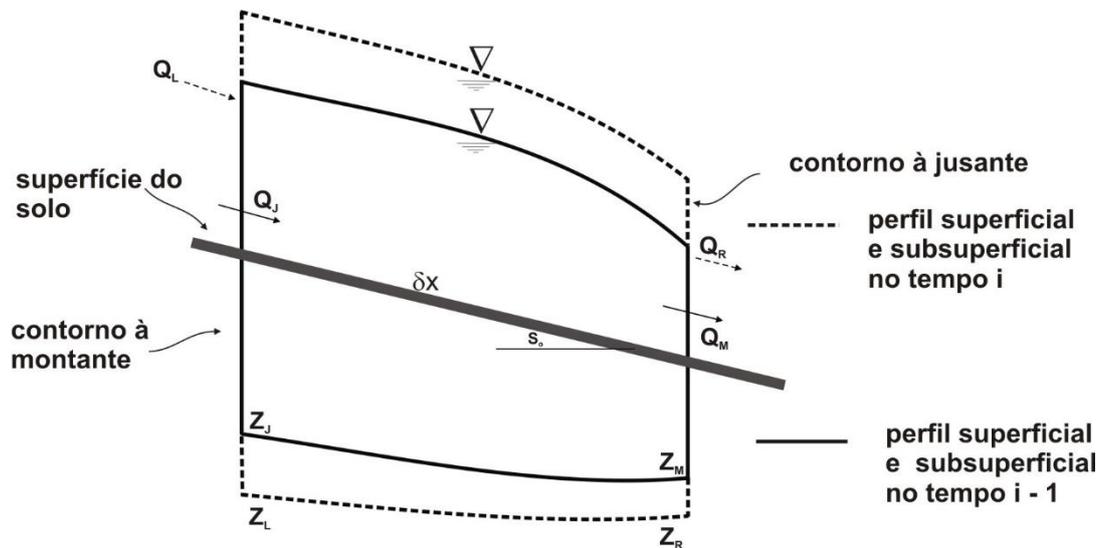


Figura 2. Célula deformada de fluxo (Walker & Skorgeboe, 1987)

Para se obter a forma integrada da equação da continuidade (Equação 1), primeiro se integra analiticamente, com relação à distância e depois numericamente, com relação ao tempo. Tem-se, então:

$$\int_t^{t+\delta t} \left(\int_x^{x+\delta x} \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) dt + \int_x^{x+\delta x} \left(\int_t^{t+\delta t} \frac{\partial A}{\partial t} dt \right) dx + \int_x^{x+\delta x} \left(\int_t^{t+\delta t} \frac{\partial Z}{\partial t} dt \right) dx = 0 \quad (10)$$

em que a primeira integração resulta em:

$$\int_t^{t+\delta t} [Q(x+\delta x, t) - Q(x, t)] dt + \int_x^{x+\delta x} [A(x, t+\delta t) - A(x, t)] dx + \int_x^{x+\delta x} [Z(x, t+\delta t) - Z(x, t)] dx = 0 \quad (11)$$

e a segunda integração em:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left[(Q_{x+\delta x, t+\delta t} - Q_{x, t+\delta t}) + (Q_{x+\delta x, t} - Q_{x, t}) \right] \delta t + \\ & \frac{1}{2} \left[(A_{x, t+\delta t} - A_{x, t})_{x+\delta x} + (A_{x, t+\delta t} - A_{x, t})_x \right] \delta x + \\ & \frac{1}{2} \left[(Z_{x, t+\delta t} - Z_{x, t})_{x+\delta x} + (Z_{x, t+\delta t} - Z_{x, t})_x \right] \delta x = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

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; desta forma, uma ponderação adequada deverá estar entre $\frac{1}{2}$ a 1. Criam-se, então, os fatores θ e ϕ para ponderarem a não linearidade no perfil, respectivamente, com relação ao tempo e ao espaço. Esses fatores são extremamente importantes apenas durante a fase de avanço, porque depois desta fase ocorre tendência de se estabelecer condições estáveis de fluxo. A ponderação deve ser maior no tempo $t+\delta t$ visto que 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); além disso, 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-se, na Equação 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 12 pode, então, ser representada, em termos da anotação, na Figura 2, como segue:

$$\begin{aligned} & [\theta(Q_R - Q_L) + (1 - \theta)(Q_M - Q_J)] \delta t + \\ & [\phi(A_L - A_J) + (1 - \phi)(A_R - A_M)] \delta x + \\ & [\phi(Z_L - Z_J) + (1 - \phi)(Z_R - Z_M)] \delta x = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

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 13 para cada célula na malha computacional (Fig. 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 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 13 ficando esta, então, apenas com uma incógnita (A_R).

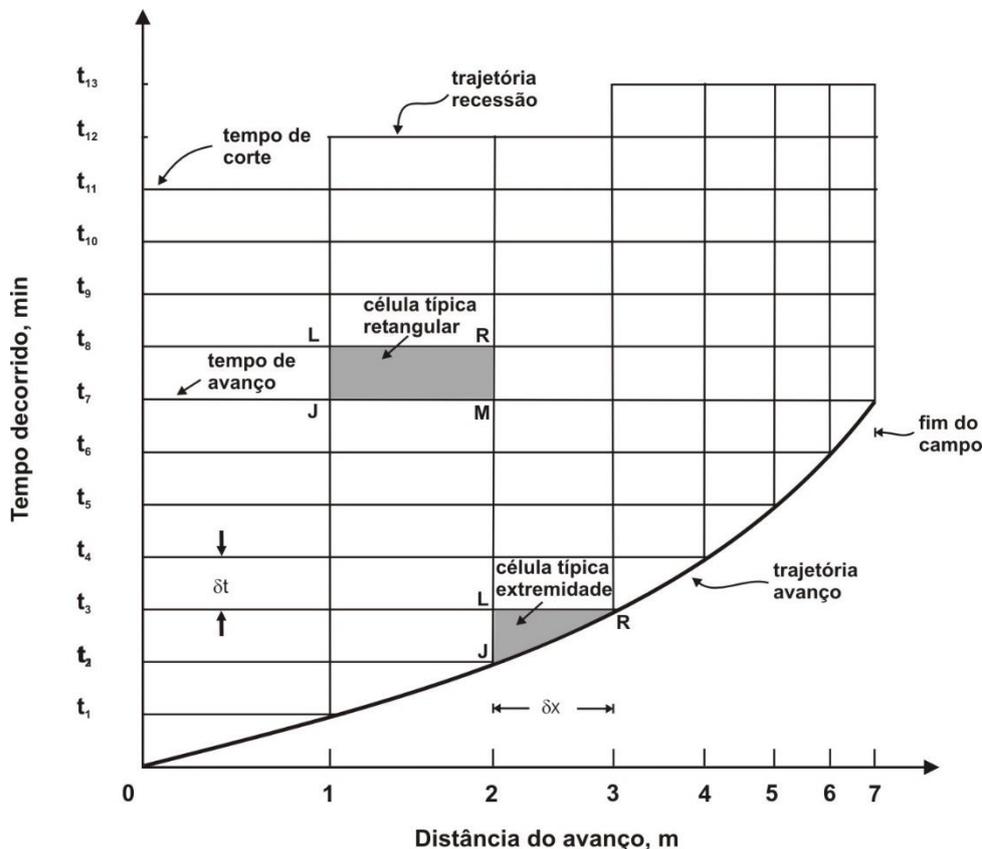


Figura 3. Malha computacional (Walker, 2001)

FONTE: WALKER (2001)

Fases de depleção e recessão

Geralmente, diz-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 negligenciaram-se as fases de depleção e recessão, considerando-se que a irrigação se encerra quando o fluxo d'água é suspenso, isto é, admitiu-se que o tempo de recessão é igual ao tempo de corte.

Vazão máxima não erosiva

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

A vazão aplicada em cada sulco deve adequar-se ao seu comprimento, à 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 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 equação seguinte:

$$Q_{m\acute{a}x} = \left[\left(\frac{V_{m\acute{a}x}^{\rho_2} n^2}{3600 S_0 \rho_1} \right) \right]^{\frac{1}{\rho_2-2}} \quad (14)$$

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 Manning, $m^{-1/3} \text{ s}$

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

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

Procedimento do balanço de volume

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

$$V_z = \frac{L}{2n} [Z_o + (2Z_1 + 2Z_2 + \dots + 2Z_{n-1}) + Z_n] \quad (15)$$

em que: L - comprimento da área, m

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

n - número de segmentos em que o sulco é subdividido

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

$$Z_i = k [t_r - (t_a)_i]^a + f_o [t_r - (t_a)_i] \quad (16)$$

Para o propósito do projeto, o tempo de corte do fluxo, t_{cutoff} substitui por t_r , na equação 16, de acordo com a equação 17.

$$Z_i = k [t_{\text{cutoff}} - (t_a)_i]^a + f_o [t_{\text{cutoff}} - (t_a)_i] \quad (17)$$

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

a - constantes empírica da equação de Kostiakov-Lewis

f_0 - taxa de infiltração básica, $m^3 m^{-1} \text{ min}^{-1}$

t_r - tempo de recessão, min

$(t_d)_i$ - 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 16.

Medidas de parâmetros de desempenho

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 o término da recessão. A Figura 3.4 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.

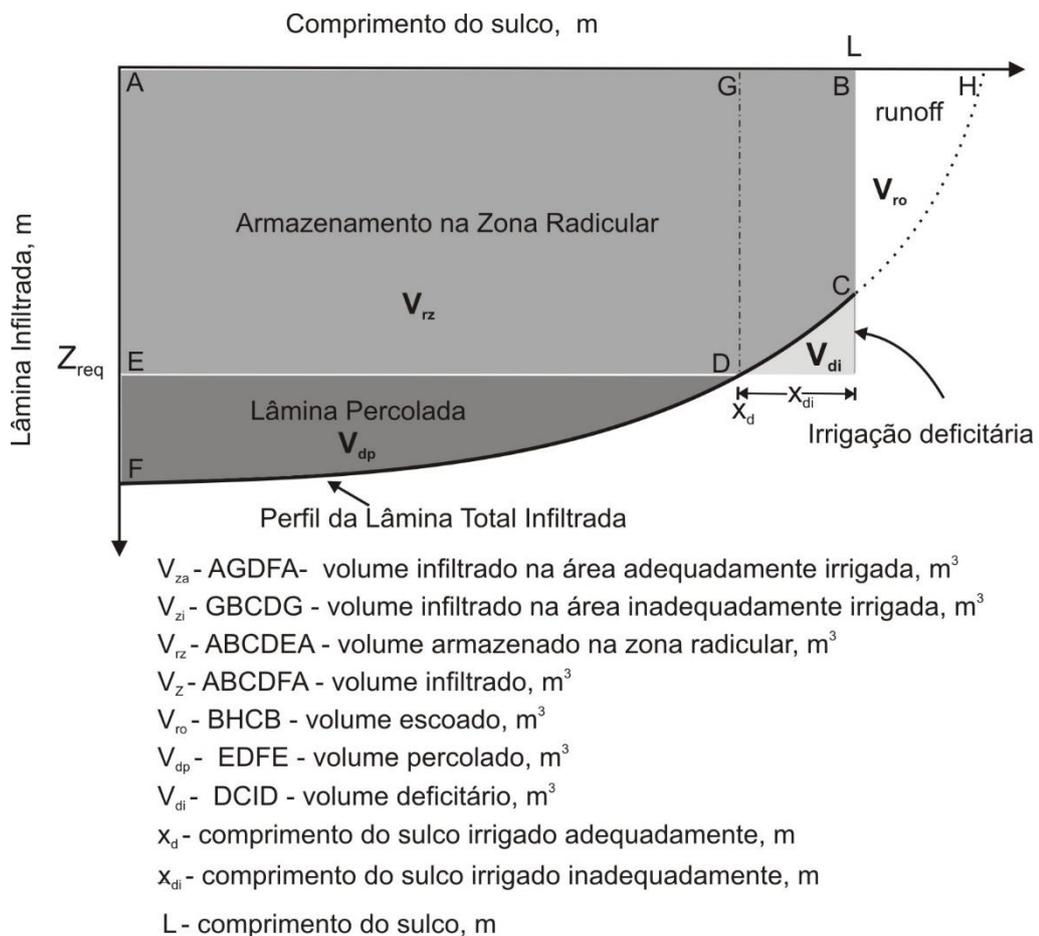


Figura 4. Componentes da água infiltrada na irrigação superficial

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

Se parte do sulco apresentar 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_{zi} , pela Eq. 3-23 15 e para a área inadequadamente irrigada, V_{za} , com a seguinte:

$$V_{zi} = V_z - V_{za} \quad (18)$$

O volume escoado por unidade de largura é dado por:

$$V_{ro} = Q t_{com} - V_z \quad (19)$$

As simulações feitas pelo modelo SASIS apontam 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 e 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.

Dentre as fases da irrigação superficial simuladas o avanço é a mais importante, em virtude de contribuir, de forma mais decisiva, para as variações no tempo de oportunidade de infiltração principalmente na irrigação por sulco, o que resulta na desuniformidade da lâmina infiltrada; assim sendo, o modelo SASIS faz a simulação apenas da fase de avanço, considerando o tempo de depleção constante ao longo da área e 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.

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 GUFQCQ, fazenda da Utah State University em Logan, USA) publicados por Azevedo (1992), empregados na demonstração do modelo SIRTOM, e um conjunto de dados (KWF-Kimberly Wheel Furrow) publicados por Walker & Skogerboe (1987). Esses conjuntos de dados (Tabela 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 2). Para maior consistência da validação do modelo SASIS, as simulações realizadas por este modelo foram comparadas com as do modelo SIRMOD (Walker, 1989), além das comparações com as medições de campo.

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)

Tabela 1. Dados de campo utilizados na validação do modelo SASIS

Dados de Campo	PISG1	PISG2	PISG3	PISG4	KWF	AMALGACQ	GUFCQ
Tipo de Solo	Franco argilo arenoso	Franco argilo arenoso	Franco arenoso	Franco argilo arenoso	Franco silte argiloso	Silte argiloso	Silte arenoso
Vazão (L s ⁻¹)	1,33*	1,47*	1,54*	1,13*	1,50**	1,80**	1,30**
Comprimento do sulco (m)	67	84	70	115	360	403	217
Declividade (m m ⁻¹)	0,0030	0,0016	0,0043	0,0024	0,0104	0,0066	0,0173
Coefficiente de Manning, n (m ^{-1/3} s)	0,020	0,020	0,025	0,020	0,013	0,013	0,013
Parâmetro da Seção, ρ_1	0,291	0,185	0,532	0,339	0,730	0,730	0,730
Parâmetro da Seção, ρ_2	2,847	2,766	2,840	2,806	2,980	2,980	2,980
k (m ³ m ^{-a} m ⁻¹)	0,03781	0,02931	0,01024	0,0054	0,0088	0,00182	0,00896
a	0,165	0,302	0,326	0,412	0,533	0,234	0,0
f_0 (m ³ min ⁻¹ m ⁻¹)	0,000186	0,000186	0,000264	0,000186	0,00017	0,00019	0,000022
Z_{req} (m)	0,090	0,060	0,020	0,020	0,090	0,090	0,050

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), empregada na demonstração do modelo SIRTOM; *Vazão praticada pelo produtor (irrigante); ** Vazão determinada em projeto, utilizada pelos autores nas demonstrações do SIRMOD e SIRTOM

Tabela 2. Dados de avanço d'água medido em campo e 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 (1987); AMALGACQ e GUFQCQ: publicada por Azevedo (1992), empregada na demonstração do modelo SIRTOM; XA: distância de avanço d'água medido em campo, m;

RESULTADOS E DISCUSSÃO

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 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 os dados PISG4, cujo SIRMOM 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, GUFQCQ, que os valores se assemelham, com variações de 2,9, 0,8, 3, 6,2%, respectivamente, justificando a semelhança entre os valores prognosticados pelos dois modelos das eficiências de aplicação e armazenamento d'água ocorrida para tais exemplos; para os outros dados de campo, constata-se diferença entre os volumes infiltrados simulados pelo SIRMOM, variando de 24 (AMALGACQ), a maior com relação aos volumes infiltrados simulados pelo SASIS .

Tabela 3. Balanço de volume d'água aplicado; infiltrado; escoado; percolado e armazenado na zona radicular, calculado pelos modelos SIRMOM e SASIS, em m³

CONJUNTO DE DADOS	SIRMOM					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
GUFQCQ	23,400	16,366	7,191	5,508	10,858	23,400	15,417	7,983	4,968	10,448

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 oito exemplos estudados observa-se, para os dados PISG1, KWF e GUFQCQ, que os valores simulados pelos dois modelos se assemelham e nos cinco restantes os valores simulados pelo SASIS são maiores que os simulados pelo SIRMOM (Tabela 3). Para os volumes percolados vê-se semelhança para os exemplos PISG1, PISG2, KWF e GUFQCQ, enquanto nos outros dados os valores simulados pelo SIRMOM superam os valores do SASIS. Provavelmente, o fato de que para todos os exemplos estudados a soma dos volumes infiltrados e escoados simulado pelo SIRMOM 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. Praticamente não houve diferença entre os valores simulados pelos dois modelos. Apesar do tempo de recessão simulado pelo SIRMOD superar o tempo de corte admitido pelo SASIS. 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. Segundo Bernardo (1995) em irrigação por sulco, pode-se negligenciar a fase de recessão e considerar o tempo de recessão igual ao tempo de corte do fornecimento d'água.

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 foi relativamente pequenos, com pequena variação de 5,1%, 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.

No que se refere ao volume de água armazenado na zona radicular, verifica-se semelhança entre os valores simulados pelos dois modelos, em cinco dos exemplos estudados, com variação de 0,8 (PISG1) a 4,7% (KWF); nos três exemplos restantes (PISG3, AMALGACQ e DEMO1) a variação foi de 19,6, 14,2 e 23%, respectivamente, superior para o SIRMOD (Tabela 3), sendo o valor superior pelo SASIS apenas para o exemplo PISG1. 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 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, o que comprova mais uma vez a veracidade nos valores simulados pelo SASIS; 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 (2003) 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.

CONCLUSÕES

- Na 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 às perdas por percolação, a ponto de se tornarem dominantes, para as condições de campo estudadas, os melhores índices de eficiência de aplicação d'água foram obtidos para vazões próximas da vazão mínima, para condições de irrigação adequada.
- 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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; 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.

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.

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

LEVIEN, S.L.A. Irrigação por superfície: Sistemas de irrigação por superfície. Mossoró-RN, ESAM, 20p. 2003.

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 parabolic arch equation on infiltration profile in furrow irrigation. 2003 ASAE Annual International Meeting, Las Vegas, NV, USA, paper n. 032243 p.1-10, 2003.

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.

WALKER, W.R.; SKOGERBOE, G.V. Surface Irrigation: Theory and Practice. Utah: 1987. 470p.

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

WALKER, W.R. SIRMOD, Surface irrigation simulation software. Utah State University. Logan, Utah, 1989.

WALKER, W.R.; HUMPHERYS, A.S. Kinematic-wave furrow irrigation model. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 109(IR4): 377-392, 1983.

STRELKOFF, T.; KATOPODES, N.D. End Depth Under Zero-Inertia Conditions. Journal of the Hydraulics Division. ASCE, 103(HY1): 699-611, 1977.

SIMULAÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR SULCO PELO MODELO SASIS: SENSIBILIDADE AOS FATORES DE FATORES DE PONDERAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL

DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-233-9_005

¹Ana Beatriz Alves de ARAÚJO,
Doutora em Engenharia Agrícola e Ambiental, UFERSA, Mossoró-RN, beatrizufersa@gmail.com

²Bianca Carolina Bernardin CATTANI,
Engenharia Agrícola e Ambiental, Graduanda, UFERSA, Mossoró-RN, biancattani@gmail.com

³Arthur Egon Hermes BRIETZKE,
Engenharia Agrícola e Ambiental, Graduando, UFERSA, Mossoró-RN,
arthur.brietzke@alunos.ufersa.edu.br

⁴Roberto Vieira PORDEUS,
Dr. Prof., UFERSA, Mossoró-RN, rpordeus@ufersa.edu.br

⁵Carlos Alberto Vieira de AZEVEDO,
Dr. Prof., UFCG, Campina Grande-PB, cvieiradeazevedo@gmail.com

⁶Luiz Antônio DANTAS,
Programador, UFCG, Campina Grande-PB, dantasluisinho@gmail.com

⁶Liherberton Ferreira dos SANTOS,
Mestre em Manejo de Solo e Água., UFERSA, Mossoró-RN, liherberton@gmail.com

SIMULAÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR SULCO PELO MODELO SASIS: SENSIBILIDADE AOS FATORES DE FATORES DE PONDERAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL

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, em geral, do dimensionamento e manejo inadequados. Assim sendo objetivou-se, com esta pesquisa 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. O modelo proposto, denominado SASIS, “Software Aplicado à Simulação da Irrigação por Superfície”. Determinadas variáveis introduzidas no modelo SASIS influenciam nos resultados da simulação da irrigação por sulco com fluxo contínuo, sendo que algumas afetaram de forma isolada, a simulação, enquanto em outras o efeito é conjugado como é o caso dos fatores de ponderação espacial (ϕ) e temporal (θ), dentre os fatores de ponderação espacial (ϕ) utilizados no intervalo de 0,51 a 0,71 e temporal (θ) no intervalo de 0,51 a 0,61 o software SASIS recomenda valores próximo de 0,60 para os dois fatores de ponderação. O modelo 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.

PALAVRAS-CHAVE: Irrigação por sulcos; Simulação; Otimização.

SIMULATION OF THE IRRIGATION FOR FURROW FOR THE MODEL SASIS: SENSIBILITY TO THE FACTORS OF SPACE CONSIDERATION AND STORM

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, because 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 proposed model denominated SASIS, “Software Applied to Simulation of the Surface Irrigation,” and had its validation tested for different field conditions. Determined variables introduced in the model SASIS influence the results of the simulation of the irrigation for furrow with continuous flow, being what someone affected in the isolated form, the simulation, while in others the effect is conjugated as is the case of the factors of space consideration (ϕ) and time (θ), among the factors of space consideration (ϕ) used in the interval from 0,51 to 0,71 and time (ϕ) in the interval from 0,51 to 0,61 the software SASIS recommends values near of 0,60 for two factors. The model 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

INTRODUÇÃO

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.

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 considerar essas variáveis e as interações entre elas (Wu & Liang, 1970; Reddy & Clyma, 1981).

Os sistemas de irrigação superficial apresentam o potencial de aplicar água aos cultivos, com eficiência de 70 a 85% (Merriam & Keller, 1978); na verdade, alguns sistemas automatizados têm favorecido eficiência em torno de 90% (Fischback & Somershalder, 1971); mas 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).

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. Dá-se, então, a fase de recessão, quando começa a 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.

De acordo com 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).

De acordo com 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 se tornam complicados devido à variação espacial e temporal dos parâmetros de campo, especialmente os de infiltração da água no solo. Segundo 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.

Os diferentes modelos de simulação da irrigação por superfície foram desenvolvidos para simular um evento de irrigação isolado, assumindo-se que não existe variabilidade espacial nos parâmetros de campo (infiltração, rugosidade, declividade e seção transversal); na prática, tem-se verificado a validade desta hipótese, tendo em vista que as simulações se têm aproximado bastante das medições de campo das fases, porém, 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.

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.

MATERIAL E MÉTODOS

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 haver uma relação única que descreve vazão como função da área de fluxo; substituiu-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 são designados ondas cinemáticas. A designação de modelos de escoamento uniforme, também usada, se deve, como é óbvio, à fundamentação numa equação própria de escoamento uniforme.

Em virtude deste tipo de modelo não ser aplicável a sulcos quando a declividade é muito pequena, ou seja, quando a declividade tende a zero: na realidade, sua precisão diminuirá quando S_0 se aproximar de zero. Utilizou-se recomendações de Strelkoff & Katopodes (1977).

Assim sendo, as equações do modelo de ondas cinemáticas utilizada passam a ser:

Equação da continuidade

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (1.0)$$

$$Q = \alpha A^m \quad (2.0) \quad \text{(Equação de Manning)}$$

$$\text{Em que: } \alpha = \frac{\sqrt{\rho_1 S_0}}{n} \quad (3.0) \quad \text{e} \quad m = \frac{\rho_2}{2} \quad (4.0)$$

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 ρ_1 e ρ_2 são constantes empíricas ajustadas às medições de campo atuais da geometria do sulco; α e m constantes empíricas.

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 seqüenciais de cálculo. A Figura 1 ilustra os perfis superficial e subsuperficial de fluxo nos tempos, t_{i-1} e t_i , identificando as células que os compõem. 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:

$$x_i = \sum_{k=1}^i \delta x_k \quad (5.0)$$

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

Uma célula típica do perfil é ilustrada na Figura 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. Desta maneira, as variáveis subscritas 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 subscritos nas fronteiras à esquerda e à direita da célula no tempo t_i . Combinando-se as células de todos os incrementos de tempo tem-se-á uma grade de cálculo no plano (x,t) , na qual as trajetórias de avanço e recessão podem ser traçadas. 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 dessas 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.

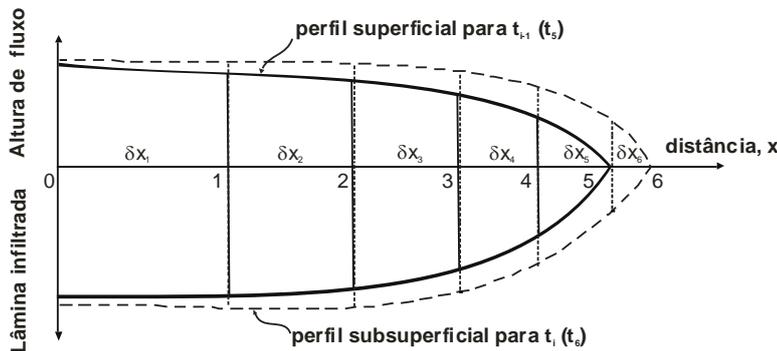


Figura 1. Esquema da progressão do fluxo superficial e da infiltração para intervalo de tempo constante
FONTE: WALKER & SKOGERBOE (1987)

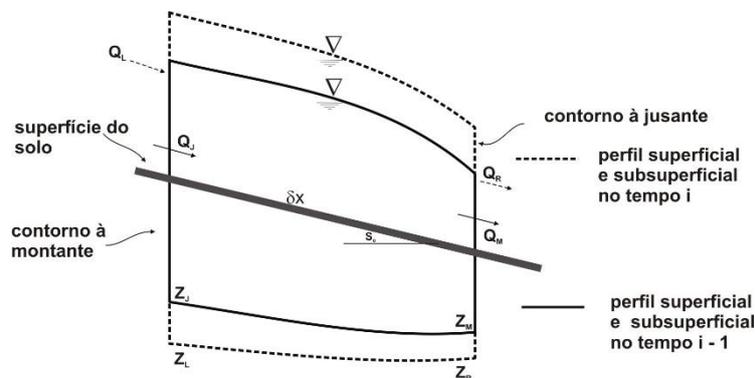


Figura 2. Célula deformada de fluxo (Walker & Skorgeboe, 1987)

A forma integrada da equação da continuidade com relação a distância e ao tempo resulta em:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left[(Q_{x+\delta x, t} - Q_{x, t})_{t+\delta t} + (Q_{x+\delta x, t} - Q_{x, t})_t \right] \delta t + \\ & \frac{1}{2} \left[(A_{x, t+\delta t} - A_{x, t})_{x+\delta x} + (A_{x, t+\delta t} - A_{x, t})_x \right] \delta x + \\ & \frac{1}{2} \left[(Z_{x, t+\delta t} - Z_{x, t})_{x+\delta x} + (Z_{x, t+\delta t} - Z_{x, t})_x \right] \delta x = 0 \end{aligned} \quad (6.0)$$

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 $1/2$ não seja apropriado para ponderar as condições de fluxo; desta forma, uma ponderação adequada deverá estar entre $1/2$ a 1. Criam-se, então, os fatores θ e ϕ para ponderarem a não linearidade no perfil, respectivamente, com relação ao tempo e ao espaço. Esses fatores são extremamente importantes apenas durante a fase de avanço, porque depois desta fase ocorre tendência de se estabelecer condições estáveis de fluxo. A ponderação deve ser maior no tempo $t+\delta t$ visto que 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); além disso, 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-se, na Equação 6.0, $1/2$ 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 6.0 pode, então, ser representada, em termos da anotação, na Figura 2, como segue:

$$\begin{aligned} & [\theta(Q_R - Q_L) + (1 - \theta)(Q_M - Q_J)] \delta t + \\ & [\phi(A_L - A_J) + (1 - \phi)(A_R - A_M)] \delta x + \\ & [\phi(Z_L - Z_J) + (1 - \phi)(Z_R - Z_M)] \delta x = 0 \end{aligned} \quad (7.0)$$

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 7.0 para cada célula na malha computacional 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 2.0), 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 7.0 ficando esta, então, apenas com uma incógnita (A_R).

Substituindo-se a Eq. 2.0 na Eq. 7.0 e se dividindo por $\theta \alpha / \delta t$, chegar-se-á à seguinte equação não linear em A_R :

$$\begin{aligned} & A_R^m + \left(\frac{1 - \phi}{\theta \alpha} \right) \frac{\delta x}{\delta t} A_R - A_L^m + \left(\frac{1 - \theta}{\theta} \right) (A_M^m - A_J^m) + \\ & \frac{\phi}{\theta \alpha} (A_L + Z_L - A_J - Z_J) \frac{\delta x}{\delta t} + \left(\frac{1 - \phi}{\theta \alpha} \right) (Z_R - A_M - Z_M) \frac{\delta x}{\delta t} = 0 \end{aligned} \quad (8.0)$$

Objetivando-se simplificar a Equação 8.0, isolam-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:

$$C_1 = \left(\frac{1 - \phi}{\theta \alpha} \right) \frac{\delta x}{\delta t} \quad (9.0)$$

e,

$$C_2 = -A_L^m - \left(\frac{1-\theta}{\theta}\right) A_J^{m+1} + \left(\frac{1-\theta}{\theta}\right) A_M^{m+1} + \frac{\phi}{\alpha\theta} (A_L + Z_L - A_J - Z_J) \frac{\delta x}{\delta t} + \left(\frac{1-\phi}{\alpha\theta}\right) (Z_R - A_M - Z_M) \frac{\delta x}{\delta t} \quad (10.0)$$

chegando-se à equação

$$A_R^{m+1} + C_1 A_R + C_2 = 0 \quad (11.0)$$

A Eq. 11.0 é utilizada para células interiores e para a primeira célula, depois da primeira etapa de cálculo. Uma vez que a Eq. 11.0 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. 2.0)

Equação de infiltração d'água foi obtida pela equação:

$$Z = k\tau^a + f_o\tau \quad (12.0)$$

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

A vazão máxima não erosiva foi obtida pela seguinte equação:

$$Q_{m\acute{a}x} = \left[\left(\frac{V_{m\acute{a}x}^{\rho_2} n^2}{3600 S_o \rho_1} \right)^{\frac{1}{\rho_2-2}} \right] \quad (13.0)$$

em que: $Q_{m\acute{a}x}$ - vazão máxima não erosiva, $m^3 min^{-1}$; $V_{m\acute{a}x}$ - velocidade máxima não erosiva, $m min^{-1}$; n - coeficiente de Manning, $m^{-1/3} s$; ρ_1 e ρ_2 - coeficientes que expressam a geometria do sulco, adimensional; S_o - declividade do sulco, $m m^{-1}$

O volume infiltrado foi determinado usando a regra trapezoidal pela equação:

$$V_z = \frac{L}{2n} [Z_o + (2Z_1 + 2Z_2 + \dots + 2Z_{n-1}) + Z_n] \quad (14.0)$$

em que: L - comprimento da área, m; Z_i - infiltração acumulada para o ponto i , $m^3 m^{-1}$; n - número de segmentos em que o sulco é subdividido

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

$$Z_i = k[t_r - (t_a)_i]^a + f_o[t_r - (t_a)_i] \quad (15.0)$$

sendo: k - constantes da equação de Kostiakov-Lewis, $m^3 min^{-a} m^{-1}$, a - constantes empírica da equação de Kostiakov-Lewis, f_o - taxa de infiltração básica, $m^3 m^{-1} min^{-1}$, t_r - tempo de recessão, min, $(t_a)_i$ - 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 15.0.

Os dados de campo neste trabalho correspondem a um conjunto de dados (AMALGACQ, propriedade privada, fazenda da Utah State University em Logan, USA) publicados por Azevedo (1992), empregados na demonstração do modelo SIRTOM. Esse conjunto de dados (Tabela 1) representa as

condições de campo e dados de avanço medido em campo. Para maior consistência da validação do modelo SASIS, as simulações realizadas por este modelo foram comparadas com as do modelo SIRMOD (Walker, 1989), além das comparações com as medições de campo.

Tabela 1. Dados de campo e de avanço d'água medido em campo e utilizados na validação do modelo SASIS

Dados de Campo	AMALGACQ	Distancia de Avanço	Tempo de Avanço
Tipo de Solo	Silte argiloso	XA	TA
Vazão (L s ⁻¹)	1,80**	0	0
Comprimento do sulco (m)	403	31	13
Declividade (m m ⁻¹)	0,0066	62	22
Coefficiente de Manning, n (m ^{-1/3} s)	0,013	93	30
Parâmetro da Seção, ρ_1	0,730	124	46
Parâmetro da Seção, ρ_2	2,980	155	53
k (m ³ m ^{-a} m ⁻¹)	0,00182	186	68
a	0,234	217	85
f_0 (m ³ min ⁻¹ m ⁻¹)	0,00019	248	98
Z_{req} (m)	0,090	279	120
		310	140
		341	155
		372	191
		403	232

** Vazão determinada em projeto, utilizada pelos autores nas demonstrações do SIRMOD e SIRTOM; distância de avanço d'água medido em campo, m; Tempo de avanço medido em minutos

RESULTADOS E DISCUSSÃO

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 em outras o efeito é conjugado, isto é, o efeito de uma depende do efeito de outras; posteriormente, será ressaltado o fato de 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 contribui para uma simulação melhor da curva de avanço, favorecendo um prognóstico mais preciso 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 os 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; nota-se, portanto, existir várias combinações de valores desses fatores, capazes de simular a fase de avanço com variações toleráveis para o prognóstico do tempo de avanço; verificam-se, também, faixas de combinações desses fatores que não permitem simulações da fase de avanço, o que certamente se deve à linearidade da curva de avanço para esses dados de campo (AMALGACQ); quanto à eficiência de aplicação e de armazenamento e ao volume infiltrado, constatou-se serem afetados diretamente pelos fatores de ponderação espacial e temporal e, também, 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 previsto 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, que, quanto mais criteriosa for a escolha dos fatores ϕ e θ , melhor será o resultado da simulação. O SIRMOD simulou, para esses dados de campo (AMALGACQ), tempo de avanço 67,3 min, prognosticou uma eficiência de aplicação d'água e de armazenamento de 67,2 e 100%, respectivamente, além de um volume infiltrado de $41,43 \text{ m}^3$, para o valor de ϕ de 0,51 e θ de 0,60. Conclui-se, portanto, na Tabela 1, que existem várias combinações de fatores de ponderação da equação de Saint-Venant, capazes 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 utilizam valores de 0,51 a 0,55. O software SASIS recomenda valores próximos de 0,60 para os dois. Conforme Carvalho (1994) os fatores de ponderação espacial e temporal, ϕ e θ , são usados na integração, em virtude da não linearidade da equação da continuidade. Pelos valores apresentados na Tabela 1 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, isto é, decresce sempre que o fator de ponderação cresce.

Tabela 1. Análise de sensibilidade da simulação, pelo modelo SASIS, com relação à variação dos fatores de ponderação espacial (ϕ) e temporal (θ), para os dados de campo AMALGACQ (Tempo de avanço = 232 min)

$\theta \backslash \phi$	0,51				0,53				0,55				0,57				0,59				0,61			
	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, %; e Vz: volume infiltrado, m³

Vê-se que na Tabela 1 as situações que melhor se aproximaram do valor medido em campo foram 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 inferiores a 0,55 e valores de ϕ superiores a 0,60, enquanto 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 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.

Analisando-se o efeito do fator de ponderação espacial ϕ e temporal θ no volume infiltrado observa-se, 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 1 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, que os menores valores prognosticados para o volume infiltrados ocorrem 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 ensejam que se consideram valores de ϕ superior a 0,60, podendo θ assumir valores entre 0,51 a 0,61.

CONCLUSÕES

- 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 nem dos parâmetros de desempenho do sistema de irrigação por sulco com fluxo contínuo.
- 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.
- 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

- KRUSE, E.G.; HEERMANN, D.F. Implications of Irrigations System Efficiencies. *Journal of Soil and Water Conservation*, 32(6): 465-470. 1977.
- MERRIAM, J.L.; KELLER, J. *Farm Irrigation System Evaluation; A Guide for Management*. Utah State University. Logan. Usa. 1978. 271p.
- REDDY, J.M.; CLYMA, W. Optimal design of furrow irrigation system. *Trans. ASAE*, 24(3): 617-623, 1981.
- 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.
- SOUZA, F. de. *Hidráulica da Irrigação por Superfície*. Apostila, 1983. 54p.
- 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).
- STRELKOFF, T.; KATOPODES, N.D. End Depth Under Zero-Inertia Conditions. *Journal of the Hydraulics Division*. ASCE, 103(HY1): 699-611, 1977.
- 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. *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.
- 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.

SOBRE OS AUTORES

Ana Beatriz Alves de Araújo - Doutora em Manejo de Solo e Água, UFERSA.

Bianca Carolina Bernardin Cattani - Engenharia Agrícola e Ambiental, Graduanda, UFERSA.

Liherton Ferreira dos Santos - Doutorando em Manejo de Solo e Água, UFERSA.

Arthur Egon Hermes Brietzke - Engenharia Agrícola e Ambiental, Graduando, UFERSA.

Luis Antônio Dantas - Programador, UFCG, Campina Grande-PB.

Márcia Rejane de Queiroz Almeida Azevedo - Doutora, Professora, UEPB.

Samara Nascimento de Lima - Engenharia Agrícola e Ambiental, Graduanda, UFERSA.

Carlos Alberto Vieira de Azevedo - Doutor, Professor, UFCG.

Roberto Vieira Pordeus - Doutor, professor, UFERSA.

José Espínola Sobrinho - Doutor, professor, UFERSA.

José Dantas Neto - Doutor, professor, UFCG.

