



Modelo computacional para suporte à decisão em áreas irrigadas. Parte I: Desenvolvimento e análise de sensibilidade¹

João C. F. Borges Júnior², Paulo A. Ferreira³, Bettina Hedden-Dunkhorst⁴ & Camilo de L. T. de Andrade⁵

RESUMO

Este trabalho se refere ao desenvolvimento de um modelo computacional para suporte à tomada de decisão, quanto ao planejamento e manejo de projetos de irrigação e/ou drenagem. O modelo computacional, denominado MCID, é aplicável em nível de unidade de produção, gerando informações sobre como diferentes práticas de manejo da irrigação e configurações do sistema de drenagem afetam a produtividade e o retorno financeiro. Essas informações podem ser empregadas em estudos de otimização de padrão de cultivo em nível de propriedade agrícola, em relação ao retorno financeiro e ao uso da água, associados à análise de risco com base em simulações. O balanço hídrico e de sais na zona radicular e as estimativas da profundidade do lençol freático e vazão nos drenos, são conduzidos em base diária. A análise de sensibilidade indicou que os parâmetros de entrada que mais influenciaram o requerimento de irrigação totalizado para o ciclo, foram espaçamento entre drenos, porosidade drenável, número da curva, condutividade hidráulica horizontal do solo saturado, profundidade da camada impermeável e os parâmetros n e α do modelo de van Genuchten-Mualem.

Palavras-chave: irrigação, drenagem, manejo solo-água-plantas-salinidade, análise financeira

Computer model for decision support on irrigated areas Part I: Development and sensitivity analysis

ABSTRACT

This paper refers to the development of a decision support model for planning and managing irrigation and/or drainage schemes. The computer model, called MCID, is applicable to a production unit level, generating information on how different irrigation management practices and drainage designs affect crop yield and financial return. This information may be applied in studies of crop patterns at farm level, taking into consideration financial return and water use, associated to risk analysis based on simulations. The water and salt balance in the root zone, as well as the water table depth and drain discharge predictions, are carried out on a daily basis. The sensitivity analysis pointed out that the most influential parameters on the seasonal irrigation requirement were: drain spacings, drainable porosity, curve number, horizontal soil saturated hydraulic conductivity, impermeable layer depth and the van Genuchten-Mualem parameters n and α .

Key words: irrigation, drainage, soil-water-plant-salinity management, financial analysis

¹ Parte de Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada à UFV

² UAG/UFRPE. CEP 55292-901, Garanhuns, PE. Fone: (87) 3761-0969. E-mail: jcborges@uag.ufrpe.br

³ DEA/UFV. CEP 36571-000, Viçosa, MG. Fone: (31) 3899-1911. E-mail: pafonso@ufv.br

⁴ Federal Agency for Nature Conservation. Konstantinstr. 110, 53179 Bonn, Germany. Fone: +49-(0)228-8491 239. E-mail: bettina.hedden-dunkhorst@bfn.de

⁵ Embrapa Milho e Sorgo. CEP 35701-970, Sete Lagoas, MG. Fone: (31) 3779-1045. E-mail: camilo@cnpms.embrapa.br

INTRODUÇÃO

A racionalização do uso da água na agricultura irrigada está relacionada, dentre outros fatores, à adequação do manejo da irrigação e do planejamento das estratégias de produção. Práticas que propiciem um desempenho técnico-financeiro otimizado do empreendimento e mitiguem o impacto ambiental devem ser empregadas.

Há décadas, a complexidade inerente ao planejamento e manejo de sistemas de irrigação e/ou drenagem vem justificando o desenvolvimento de modelos como ferramenta de apoio à tomada de decisão (Skaggs, 1999; Tarjuelo & Juan, 1999). Esta complexidade é decorrente do grande número de variáveis e processos envolvidos no sistema solo-água-planta-atmosfera.

No escopo da agricultura irrigada, modelos de simulação são aqueles nos quais são considerados, de forma contínua, os efeitos e interações dos processos que governam os estados do sistema solo-água-planta-atmosfera ou de seus subsistemas.

O uso de modelos computacionais de simulação propicia ganhos em termos de tempo e economia de recursos materiais e financeiros podendo ser, também, eficazes instrumentos de difusão de agrotecnologias. Para isto, é importante que sejam providos de interface interativa com o usuário, que oriente e facilite o uso dos mesmos.

Modelos computacionais de simulação podem ser aplicados para estimativa da produtividade das culturas, em resposta a déficits hídricos, salinidade e excesso de água na zona radicular, resultantes de diferentes estratégias de manejo de irrigação e configurações de sistemas de drenagem (Garcia et al., 1995); assim, pode-se também estimar o retorno financeiro em nível de unidade de produção. Unidade de produção, aqui, refere-se a uma área sujeita a sistemas e manejo de irrigação e/ou drenagem específicos, com determinada cultura ou seqüência de culturas cultivadas em um ano, em um mesmo tipo de solo, no que se refere às características físicas que afetam o movimento de água.

No Brasil e em outros países em desenvolvimento, há pouca disponibilidade de modelos computacionais aplicáveis à estimativa da produtividade de culturas e à análise financeira, em resposta à configuração e ao manejo de sistemas de irrigação e/ou drenagem. Um aspecto significativo é que modelos computacionais dessa natureza devem ser aplicáveis conforme a disponibilidade de dados nesses países. Em estudo relacionado à sustentabilidade da agricultura irrigada em países em desenvolvimento (inclusive Brasil), Abbott & Leeds-Harrison (1998) relatam que o IPTRID (International Program for Technology Research in Irrigation and Drainage) detectou, como uma das principais demandas de pesquisa para drenagem agrícola, tanto em regiões de clima árido ou semi-árido quanto úmido ou sub-úmido, o desenvolvimento de ferramentas computacionais de interface amigável aplicáveis ao delineamento e planejamento de projetos de drenagem associados a projetos de irrigação.

Objetivou-se, com este trabalho:

- a) desenvolver um modelo computacional para suporte à tomada de decisão em agricultura irrigada, cujas principais funções são:

- simular o desempenho técnico e financeiro de diferentes estratégias de manejo de irrigação e/ou configurações de sistemas de drenagem, considerando-se os efeitos do déficit hídrico, salinidade e excesso de água na zona radicular sobre a produtividade das culturas;
 - estimar valores diários dos componentes do balanço hídrico e de sais na zona radicular e a variação da profundidade do lençol freático e vazão nos drenos;
 - auxiliar no dimensionamento de sistemas de drenagem agrícola.
- b) aplicar análise de sensibilidade visando determinar os efeitos dos dados de entrada sobre o requerimento de irrigação obtido com a aplicação do modelo.

Apresentam-se, na Parte II deste trabalho, testes e exemplos de aplicação do modelo desenvolvido; ressalta-se que o modelo é também aplicável à agricultura de sequeiro.

MATERIAL E MÉTODOS

Desenvolvimento do modelo

O modelo computacional, denominado MCID, foi desenvolvido em Delphi (Borland Software Corporation), sendo aplicável em nível de unidade de produção. O balanço hídrico e de sais na zona radicular, além de estimativas da profundidade do lençol freático, são conduzidos em base diária. Nas simulações procedidas com o modelo, observa-se o efeito de diferentes manejos de irrigação e configurações da rede de drenagem, os quais afetam o balanço hídrico e de sais na zona radicular e a variação da profundidade do lençol freático, sobre a produtividade da cultura, uso da água (requerimento de irrigação e perdas por percolação) e retorno financeiro. Os dados de entrada e saída e os cálculos realizados são esquematizados na Figura 1.

O MCID é um programa computacional cuja aplicação é uma seqüência de entrada de dados, processamento de cálculos e acesso aos resultados. A entrada de dados é feita diretamente nos formulários do programa ou por arquivos texto criados a partir de planilhas eletrônicas (Excel, QuatroPro, Lotus, dentre outras). O acesso aos resultados é feito por meio dos formulários do programa ou arquivos de resultados. Este modelo computacional pode ser utilizado para:

- Planejamento (estudos de delineamento de projeto ou planejamento periódico) – diferentes estratégias de manejo de irrigação e/ou configurações do sistema de drenagem podem ser testadas.
- Tomada de decisão quanto ao manejo de irrigação – quando a simulação estiver sendo feita para um projeto já implantado, no ano corrente, poderão ser obtidas informações a respeito de quando e quanto irrigar.

Dois esquemas, relativos ao balanço hídrico na zona radicular, são modelados no MCID. No Esquema 1 considera-se a existência de drenos laterais subterrâneos. O nível freático varia ao longo do tempo devido à percolação, sípage¹,

¹ Adaptado do termo inglês "seepage", o qual se refere às infiltrações de origens distintas (como canais, áreas altas irrigadas e lagos) que se manifestam em áreas mais baixas, podendo alcançar a superfície (Pizarro, 1985)

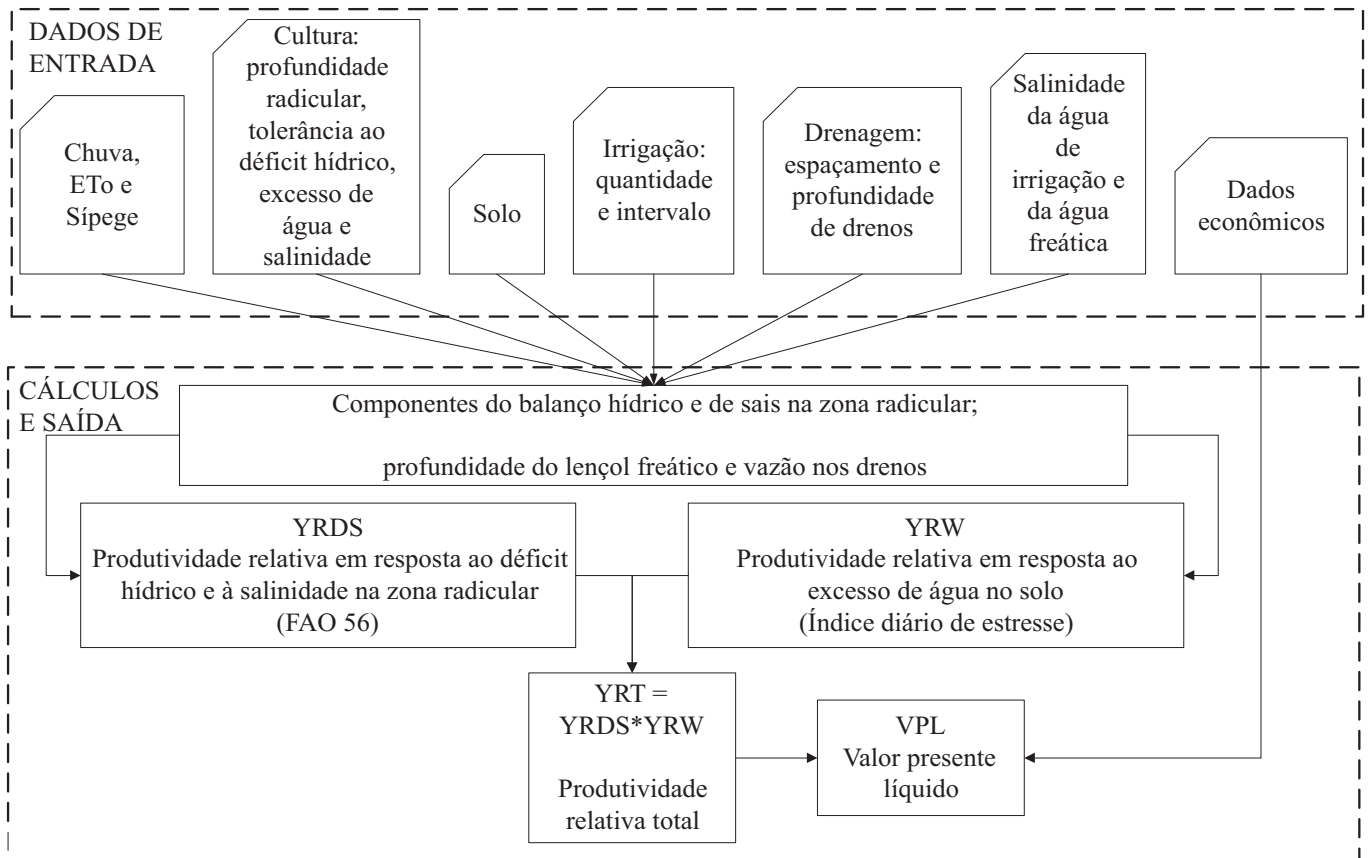


Figura 1. Esquema de entrada de dados e cálculos do MCID

drenagem e fluxo ascendente de água na região não saturada, oriundo do lençol freático. O Esquema 1 é apresentado na Figura 2.

No Esquema 2, apresentado na Figura 3, considera-se o lençol freático a uma profundidade suficientemente grande

para que o fluxo ascendente na região não saturada, oriundo do lençol, seja desprezível. Não é considerada a existência de uma rede de drenos subterrâneos, situação esta similar à modelada no programa CROPWAT, desenvolvido pela Land and Water Development Division – FAO.

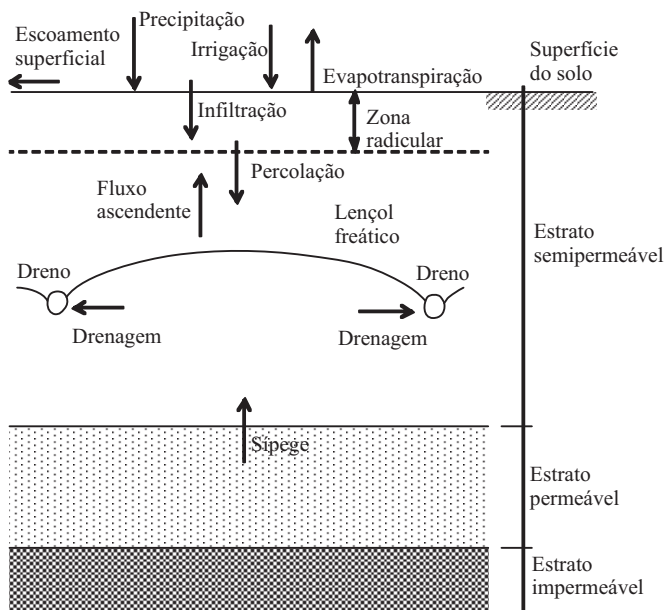


Figura 2. Representação esquemática do balanço hídrico na zona radicular e do movimento de água abaixo da zona radicular, considerando-se a drenagem artificial

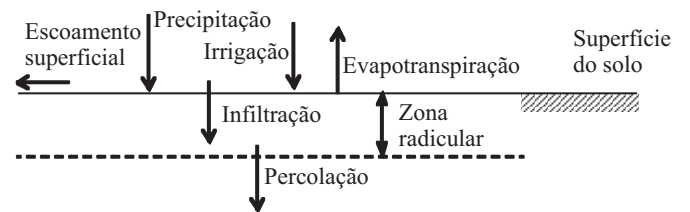


Figura 3. Representação esquemática do balanço hídrico na zona radicular, para situação com lençol freático profundo

A quantidade de sais entrando e saindo da zona radicular é proporcional ao fluxo de água que entra e sai, observando-se as concentrações nos diferentes componentes do balanço hídrico. Esta aproximação é similar às empregadas nos modelos apresentados por Prajamwong et al. (1997) e Cai et al. (2003). Desconsideram-se o fator de retardamento, a dispersão e difusão, além das interações entre os diferentes íons. Espera-se que, para o período de análise, que pode contemplar de um ciclo de cultivo a vários anos, erros advindos dessa aproximação sejam minorados. As rotinas que processam o balanço de sais são, portanto, ligadas às rotinas do balanço hídrico, havendo procedimentos específicos para os esquemas 1 ou 2.

Para o caso em que se considera drenagem artificial na área (Esquema 1), os cálculos da altura do lençol freático sobre o plano dos drenos e da vazão nos drenos são feitos utilizando-se as equações de drenagem de Kraijenhoff van de Leur – Maasland (Kraijenhoff van de Leur, 1958; Pizarro, 1985; Ferreira, 2001; Borges Júnior et al., 2001). A estimativa do fluxo ascendente proveniente do lençol freático (escoamento na região não saturada do perfil do solo), que chega à base da zona radicular, é baseada na curva característica do solo, evapotranspiração real da cultura e profundidade do lençol freático (Borges Júnior, 2004). No procedimento, emprega-se a equação de Darcy-Buckingham, escrita na forma de diferenças finitas, associada aos modelos de van Genuchten (1980) e Mualem (1976) para relacionar teor de água no solo, potencial matricial e condutividade hidráulica em meio não saturado (Simunek et al., 2005).

A função $\theta(\Psi)$, conforme descrita pelo modelo de van Genuchten (1980), é expressa por:

$$\theta(\Psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\Psi|^n)^m} \quad (1)$$

em que

$\theta(\Psi)$ – teor de água como função do potencial matricial Ψ (m), $m^3 m^{-3}$

θ_r – teor de água residual do solo, $m^3 m^{-3}$

α – parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, m^{-1}

n, m – parâmetros adimensionais, em que $m = 1-1/n$

Van Genuchten (1980) utilizou o modelo estatístico de distribuição de tamanho de poros de Mualem (1976), para obter uma equação para estimativa da função de condutividade hidráulica em meio não saturado em termos de parâmetros da retenção de água no solo:

$$K(\theta) = K_{vo} S_e^c \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (2)$$

em que

$K(\theta)$ – condutividade hidráulica do solo não-saturado, em função do teor de água θ , $m \text{ dia}^{-1}$

K_{vo} – condutividade hidráulica vertical do solo saturado, $m \text{ dia}^{-1}$

S_e – teor de água efetivo, adimensional

c – parâmetro relativo à conectividade de poros, adimensional

O teor de água efetivo, S_e , é dado por

$$S_e = \frac{\theta(\Psi) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha\Psi|^n)^m} \quad (3)$$

O parâmetro c foi estimado em 0,5, representando uma média obtida para muitos solos (Mualem, 1976; Simunek et al., 2005).

No cálculo da parcela da precipitação que infiltra, leva-se em consideração o escoamento superficial obtido pelo método do número da curva (Soil Conservation Service, 1972) e/ou com base na lâmina de água que excede a capacidade de armazenamento superficial (Borges Júnior, 2004).

Alternativamente, procedimentos empíricos para cálculo da precipitação efetiva, similares aos implementados no programa CROPWAT, poderão ser previamente empregados para obtenção da precipitação efetiva que, neste caso, é um dado de entrada.

A lâmina e o intervalo de irrigação podem ser considerados variáveis de entrada ou variáveis a serem calculadas, com base no balanço hídrico e de sais na zona radicular e conforme parâmetros fornecidos pelo usuário, como o déficit de água em relação à capacidade de água disponível do solo para indicar o momento de irrigar, a eficiência potencial de aplicação e a eficiência de distribuição de projeto (Keller & Bliesner, 1990; Borges Júnior & Mantovani, 2001).

A estimativa da produtividade relativa das culturas é efetuada para cada ano de simulação, sendo que até três cultivos anuais poderão ser considerados. Conforme indicado na Figura 1, o modelo analisa os efeitos do déficit hídrico e da salinidade na zona radicular e, separadamente, do excesso de água no solo sobre a produtividade das culturas; posteriormente, estima a produtividade relativa total. Enquanto várias configurações do sistema de drenagem podem ser avaliadas em uma mesma aplicação (até vinte espaçamentos e três profundidades de drenos laterais), diferentes estratégias de irrigação podem ser avaliadas em aplicações subsequentes.

A resposta da produtividade relativa das culturas ao déficit hídrico e à salinidade é calculada conforme Allen et al. (1998). Quanto ao excesso de água no solo, a resposta da produtividade relativa é calculada com base no índice diário de estresse (Evans & Fausey, 1999). O estresse devido ao excesso de água no solo na zona radicular é considerado apenas para a modelagem relativa ao Esquema 1.

A Figura 4 mostra o esquema para cálculo da produtividade relativa total.

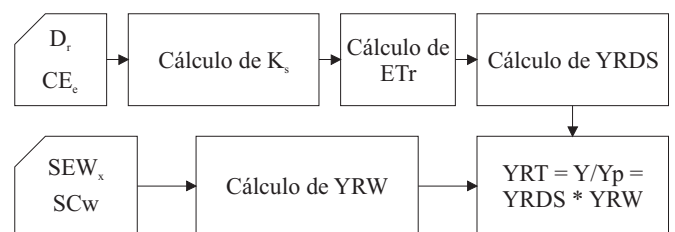


Figura 4. Esquema de cálculo de produtividade relativa total – YRT

Os termos indicados na Figura 4 são:

D_r – depleção de água na zona radicular, mm

CE_e – condutividade elétrica média do extrato da pasta saturada do solo na zona radicular, $dS m^{-1}$

K_s – coeficiente de estresse hídrico (engloba déficit hídrico e salinidade), adimensional [0 – 1]

E_{Tr} – evapotranspiração real, mm

$YRDS$ – produtividade relativa, caso ocorra estresse devido somente ao déficit hídrico e à salinidade, decimal

SEW_x – soma dos excessos diários de água a profundidades menores que X cm, $cm\text{-dia}$

SC_w – fator de suscetibilidade da cultura ao excesso de água no solo na zona radicular, $cm^{-1} d^{-1}$

YRW – produtividade relativa, caso ocorra estresse devido somente ao excesso de água no solo, decimal

YRT – produtividade relativa total, decimal

Y – produtividade real, kg ha⁻¹

Yp – produtividade potencial, kg ha⁻¹

O cálculo de K_s é feito em base diária, conforme a equação

$$K_s = K_{sd} K_{ss} \quad (4)$$

em que

K_{sd} – coeficiente de estresse devido ao déficit hídrico, adimensional [0 – 1]

K_{ss} – coeficiente de estresse devido à salinidade, adimensional [0 – 1]

Dois metodologias para cálculo do K_{sd} estão implementadas no modelo, podendo o usuário optar por uma delas. Na metodologia descrita por Allen et al. (1998), quando Dr for maior que a capacidade real de água no solo, K_{sd} é expresso por:

$$K_{sd} = \frac{CTA - Dr}{CTA - CRA} = \frac{CTA - Dr}{(1 - f)CRA} \quad (5)$$

em que

CTA – capacidade total de água do solo, mm

CRA – capacidade real de água do solo, mm

f – fator de disponibilidade, decimal

Quando Dr ≤ CRA, K_{sd} é igual a 1.

Na segunda metodologia (Bernardo, 2005), K_{sd} é calculado como

$$K_{sd} = \frac{\ln(\text{arm} - \text{PM} + 1)}{\ln(\text{CC} - \text{PM} + 1)} \quad (6)$$

em que

ln – logaritmo neperiano

arm – lâmina de água armazenada na zona radicular, mm

PM – lâmina de água armazenada na zona radicular, para o teor de água no ponto de murcha permanente, mm

CC – lâmina de água armazenada na zona radicular, para o teor de água na capacidade de campo, mm

Quando CE_e > CE_{e limiar}, o cálculo de K_{ss} é feito com a equação (Allen et al., 1998)

$$K_{ss} = 1 - \frac{bs}{K_y 100} (CE_e - CE_{e \text{ limiar}}) \quad (7)$$

em que

bs – redução na produtividade (%) por aumento unitário em CE_e, dS m⁻¹

K_y – fator de resposta da cultura, decimal

CE_{e limiar} – condutividade elétrica do extrato da pasta saturada do solo no limiar do decréscimo da produtividade, dS m⁻¹

Quando CE_e ≤ CE_{e limiar}, K_{ss} é igual a 1.

O cálculo da evapotranspiração potencial e da evapotranspiração real, em base diária, é realizado empregando-se as equações (Allen et al., 1998)

$$ETp = (K_{cb} + K_c)ET_0 \quad (8)$$

ou

$$ETp = K_c ET_0 \quad (9)$$

e

$$ETr = (K_s K_{cb} + K_c)ET_0 \quad (10)$$

ou

$$ETr = K_s K_c ET_0 \quad (11)$$

em que

ETp – evapotranspiração potencial, mm

K_{cb} – coeficiente basal da cultura, adimensional

K_e – coeficiente de evaporação, adimensional

K_c – coeficiente da cultura, adimensional

ET₀ – evapotranspiração de referência, mm

Nas Eq. 8 e 10 é utilizado um coeficiente dual, o qual divide a evapotranspiração em evaporação e transpiração; nas Eq. 9 e 11 é empregado um coeficiente simples. Cabe ao usuário optar por quais equações utilizar.

O cálculo de K_e é realizado por meio da equação (Prajawong et al., 1997):

$$K_e = (K_{c \text{ max}} - K_{cb}) \sqrt{\frac{\theta_{\text{SUP}} - 0,5\theta_{\text{PM}}}{\theta_s - 0,5\theta_{\text{PM}}}} \quad (12)$$

em que

K_{c max} – K_c máximo, adimensional, correspondente ao limite superior para evaporação e transpiração, para qualquer superfície com cobertura vegetal; é uma imposição para refletir as restrições quanto à energia disponível. Varia de aproximadamente 1,05 a 1,30 (Allen et al., 1998)

θ_{SUP} – teor atual de água do solo na profundidade efetiva do perfil no solo, definida pelo usuário para os dias em que o solo estiver sem cobertura vegetal, m³ m⁻³

θ_{PM} – teor de água do solo no ponto de murcha permanente, m³ m⁻³

Se K_e > K_{c max} few, K_e torna-se (Allen et al., 1998)

$$K_e = K_{c \text{ max}} \text{ few} \quad (13)$$

em que few é a fração da superfície do solo molhada e exposta (decimal), expressa por

$$\text{few} = \min(1 - fc, fw) \quad (14)$$

em que

fc – fração do solo coberta, ou sombreada, pela vegetação [0 – 0,99]

fw – fração do solo molhada pela irrigação ou precipitação [0,01 – 1]

A função $\min(\cdot)$, na Equação 14, seleciona o menor valor entre $1-fc$ e fw . O valor de fc depende do estágio de desenvolvimento da cultura. O valor de fw é igual a 1, quando ocorre precipitação; caso contrário, é igual à fração do solo molhada pela irrigação, fwi , que depende do método de irrigação utilizado. Valores típicos de fc e fwi podem ser obtidos de Allen et al. (1998).

A Eq. 10 pode ser reescrita como

$$ETr = Tr + Ev \quad (15)$$

em que

Tr – transpiração, mm

Ev – evaporação, mm

O limite superior para a evaporação, calculada em base diária, é dado por:

$$Ev \leq (\theta_{sup} - \theta_{pm})10 \text{ profsup} \quad (16)$$

em que $profsup$ é a profundidade efetiva do perfil do solo (cm), definida pelo usuário, para os dias em que o solo estiver sem cobertura vegetal.

Após o cálculo de K_s e ETr , em base diária, os valores de ETr e ETp serão totalizados para cada estágio de desenvolvimento da cultura e para todo o ciclo. O cálculo de $YRDS$ é feito por meio das equações:

$$YRDS_{es} = 1 - K_{yes} \left(1 - \frac{ETr_{es}}{ETp_{es}} \right) \quad (17)$$

$$YRDS_{ciclo} = 1 - K_{yciclo} \left(1 - \frac{ETr_{ciclo}}{ETp_{ciclo}} \right) \quad (18)$$

em que o subscrito es representa o estágio de desenvolvimento fenológico. O usuário poderá definir o cálculo final de $YRDS$ mais adequado à cultura em apreço, adotando uma das seguintes alternativas: (a) utilizar $YRDS$ contabilizada para o ciclo; (b) utilizar o menor valor de $YRDS$ contabilizado para cada estágio ou (c) utilizar o menor valor de $YRDS$ calculado para cada estágio e para o ciclo.

Os efeitos do déficit hídrico e da salinidade sobre a produtividade podem ser avaliados, separadamente, por meio do cálculo de YRD e YRS , em que YRD é a produtividade relativa em resposta somente ao déficit hídrico (decimal) e YRS é a produtividade relativa em resposta apenas à salinidade (decimal). O procedimento para obtenção de YRD e YRS consiste, em uma primeira etapa, em se calcular, em base diária, valores ‘virtuais’ de ETr a partir dos valores de ETp , utilizando-se K_{sd} ou K_{ss} , respectivamente; o cálculo de YRD e YRS é, então, procedido similarmente ao cálculo de $YRDS$.

A produtividade relativa em resposta somente ao excesso de água no solo, YRW , é calculada com base no índice diário de estresse e na soma dos excessos diários de água a profundidades menores que X cm, SEW_X (Hardjoamidjojo et al., 1982; Evans & Fausey, 1999; Borges Júnior, 2004).

Na análise financeira, o critério utilizado é o valor presente líquido por unidade de área (VPL, R\$ ha⁻¹ – Figura 1). A relação benefício-custo (BC) também é calculada. Os cus-

tos variáveis considerados são a soma dos custos de produção (variáveis com a quantidade produzida), custos variáveis de irrigação (variáveis com a quantidade de irrigação, englobando energia) e custos de manutenção da rede de drenos (variáveis com a configuração do sistema de drenagem). Os custos fixos podem englobar o custo de aquisição do sistema de irrigação e o custo de implantação da rede de drenos, além de outros custos gerais incidindo sobre o projeto.

As variáveis ETr , ETp , SEW , YRW , YRD , YRS , $YRDS$, YRT , receita bruta anual (RA, R\$ ha⁻¹), VPL, BC e requerimento de irrigação, real (RI) e total (RIT), são totalizadas para cada ano da simulação, período de cultivo no ano (até três por ano) e para cada configuração do sistema de drenagem, quando a drenagem estiver sendo considerada. Médias e desvios padrão são calculados para as variáveis totalizadas anualmente e em cada período de cultivo no ano. Com esses parâmetros são definidas funções de densidade de probabilidade (FDPs) com distribuição normal; o usuário poderá, então, verificar o valor das variáveis acima citadas, a diferentes níveis de probabilidade. Essas informações poderão ser posteriormente empregadas em estudos de otimização de padrão de cultivo em nível de propriedade agrícola (fazenda), quanto ao retorno financeiro e ao uso da água, associados à análise de risco com base em simulações pelo método de Monte Carlo ou similares (Borges Júnior et al., 2003).

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade visa verificar se um modelo produz resultados lógicos em função de alterações em parâmetros de entrada e a necessidade de precisão desses parâmetros (Gowda et al., 1999). A estabilidade da solução é avaliada sob uma condição *ceteris paribus*, por meio da qual o efeito da alteração no valor de um único parâmetro de entrada (ou uma única variável de entrada) é considerado, enquanto todos os outros são mantidos constantes (Hazell & Norton, 1986).

A variável de saída considerada foi o requerimento de irrigação, RI (mm), totalizado para o ciclo. As variáveis de entrada analisadas foram: espaçamento e profundidade de drenos, condutividade hidráulica horizontal do solo saturado (K_{ho} , m dia⁻¹), condutividade hidráulica vertical do solo saturado (K_{vo} , m dia⁻¹), raio do dreno, porosidade drenável, profundidade do perfil, parâmetros do modelo de van Genuchten (n , a e c) e número da curva (CN). Para CN foram consideradas não apenas as variações para a condição de umidade inicial média (AMC II), mas também os valores tabelados respectivos para as condições de umidade inicial baixa (AMC I) e alta (AMC III). Foram analisadas variações nos valores das variáveis de entrada de -90 a 100%, em relação aos valores da base de dados.

Na base de dados utilizada na análise de sensibilidade, considerou-se a cultura do milho plantada no dia 15 de janeiro. A duração dos estágios fenológicos e do ciclo e os valores de fator de resposta (K_y), fator de disponibilidade (f) e fração do solo coberta (fc) são apresentados na Tabela 1. Consideraram-se coeficientes basais da cultura (K_{cb}) iguais a 0,15, 1,15 e 0,15, para os períodos inicial, intermediário e final, respectivamente, e um valor de K_c máximo igual a 1,15 (Allen et al., 1998).

Tabela 1. Duração dos estádios fenológicos e do ciclo e valores de fator de resposta (K_c), fator de disponibilidade (f) e fração do solo coberta (f_c) utilizados na análise de sensibilidade

	Estádio				Total
	I	II	III	IV	
Duração (dias)	20	35	40	25	120
K_y	0,4	0,4	1,3	0,5	1,3
f	0,5	0,5	0,5	0,8	
f_c	0,1	0,5	1	0,4	

Foram utilizadas séries históricas de dados climáticos, em base diária, da estação meteorológica de Nova Porteirinha, MG, latitude 15° 47' Sul, longitude 43° 18' Oeste e altitude de 533 m, para os seguintes elementos climáticos: precipitação, temperaturas máximas, mínimas e médias, umidade relativa do ar, insolação e velocidade de vento. A evapotranspiração de referência foi então calculada, em base diária, pelo método de Penman-Monteith, utilizando-se o programa REF-ET. O município de Nova Porteirinha abrange parte do perímetro de irrigação Gorutuba.

Considerou-se um solo característico do Projeto Gorutuba, com teores de areia, silte e argila iguais a 42, 27 e 31%, respectivamente, e densidade igual a 1,53 g cm⁻³ (Nunes, 2003). Obtiveram-se, com base nesses valores, os parâmetros θ_r , n e α , do modelo de van Genuchten, por meio do modelo computacional de pedotransferência Rosetta, implementado no programa Hydrus1-D (Simunek et al., 2005). Os dados relativos ao solo são apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Parâmetros físico-hídricos do solo utilizados na análise de sensibilidade do modelo

Parâmetro	Valor
Condutividade hidráulica horizontal do solo saturado	0,5 m d ⁻¹
Condutividade hidráulica vertical do solo saturado	0,5 m d ⁻¹
Porosidade drenável	0,03 m ³ m ⁻³
Teor de água do solo saturado	0,43 m ³ m ⁻³
Teor de água do solo na capacidade de campo	0,33 m ³ m ⁻³
Teor de água do solo no ponto de murcha permanente	0,18 m ³ m ⁻³
Teor de água do solo no dia inicial	0,33 m ³ m ⁻³
Altura do lençol freático acima do plano dos drenos no dia inicial	0,60 m
Profundidade do perfil (camada impermeável)	5 m
Número da curva (condição de umidade inicial média)	76

Tabela 3. Parâmetros do modelo de van Genuchten – Mualem

Parâmetro	Valor
Teor de água residual (θ_r)	0,0738 m ³ m ⁻³
n	1,3562 (adimensional)
α	1,57 m ⁻¹
c	0,5 (adimensional)

A Tabela 4 apresenta os parâmetros geométricos do sistema de drenagem, considerados na análise de sensibilidade.

Foi considerado um intervalo de 7 dias entre irrigações, sendo que a lâmina de irrigação foi calculada para atingir a capacidade de campo, ou seja, para preencher 100% da ca-

Tabela 4. Parâmetros geométricos do sistema de drenagem

Parâmetro	Valor (m)
Espaçamento entre drenos	50
Profundidade dos drenos	1,2
Raio efetivo dos drenos	0,05

pacidade real de água do solo. A eficiência potencial de aplicação e a eficiência de distribuição de projeto consideradas foram 0,9 e 0,8, respectivamente. Considerou-se que a irrigação iniciava 1 dia após o plantio, sendo finalizada 10 dias antes da colheita.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de sensibilidade

Para a base de dados considerada se obteve um requerimento de irrigação para o ciclo, RI, igual a 133 mm. Os resultados da análise de sensibilidade, apresentados na Figura 5, refletem o efeito das variações nos valores das variáveis de entrada avaliadas sobre o fluxo ascendente oriundo do lençol freático e, conseqüentemente, sobre RI.

Na Figura 5A, que apresenta resultados para as variáveis relacionadas à geometria do sistema de drenagem, observa-se que o espaçamento entre drenos foi a variável que mais influenciou o requerimento de irrigação. Variações de -90 e 100% no espaçamento implicaram em variações de 38 e -91%, respectivamente, em RI. Quanto à profundidade de drenos, apenas variações superiores a 60% implicaram em variações expressivas em RI, que atingiram 23% para uma variação na profundidade igual a 100%. Observa-se que o raio de drenos pouco influenciou em RI, exceto para pequenos valores dessa variável; uma variação de -90% no raio de drenos implicou em uma variação de -23% no requerimento de irrigação.

Na Figura 5B são apresentados resultados para as variáveis condutividade hidráulica horizontal do solo saturado (K_{ho}), porosidade drenável (P_d), profundidade da camada impermeável (D_{ci}) e número da curva (CN). Observa-se que variações negativas em K_{ho} e D_{ci} acarretaram variações em RI sensivelmente superiores às acarretadas por variações positivas. A variação de -90% em K_{ho} acarretou variação de -93% em RI, enquanto uma variação de 100% resultou em uma variação de 24% em RI. Para D_{ci} , uma variação de -70% implicou em -100% de variação em RI; já a variação de 100% resultou em 12% de variação para RI. Esta assimetria quanto à sensibilidade do requerimento de irrigação a K_{ho} e D_{ci} é explicada pelo efeito dessas variáveis sobre a profundidade do lençol freático. Variações negativas em K_{ho} e D_{ci} acarretam menores profundidades do lençol ao longo do ciclo; o efeito sobre o fluxo ascendente e, conseqüentemente, sobre o requerimento de irrigação, de variações em pequenas profundidades do lençol, é maior que o efeito de variações, de mesma magnitude, em maiores profundidades do lençol.

Variações em P_d foram inversamente proporcionais às variações em RI. Quanto menor o valor em P_d , maior será

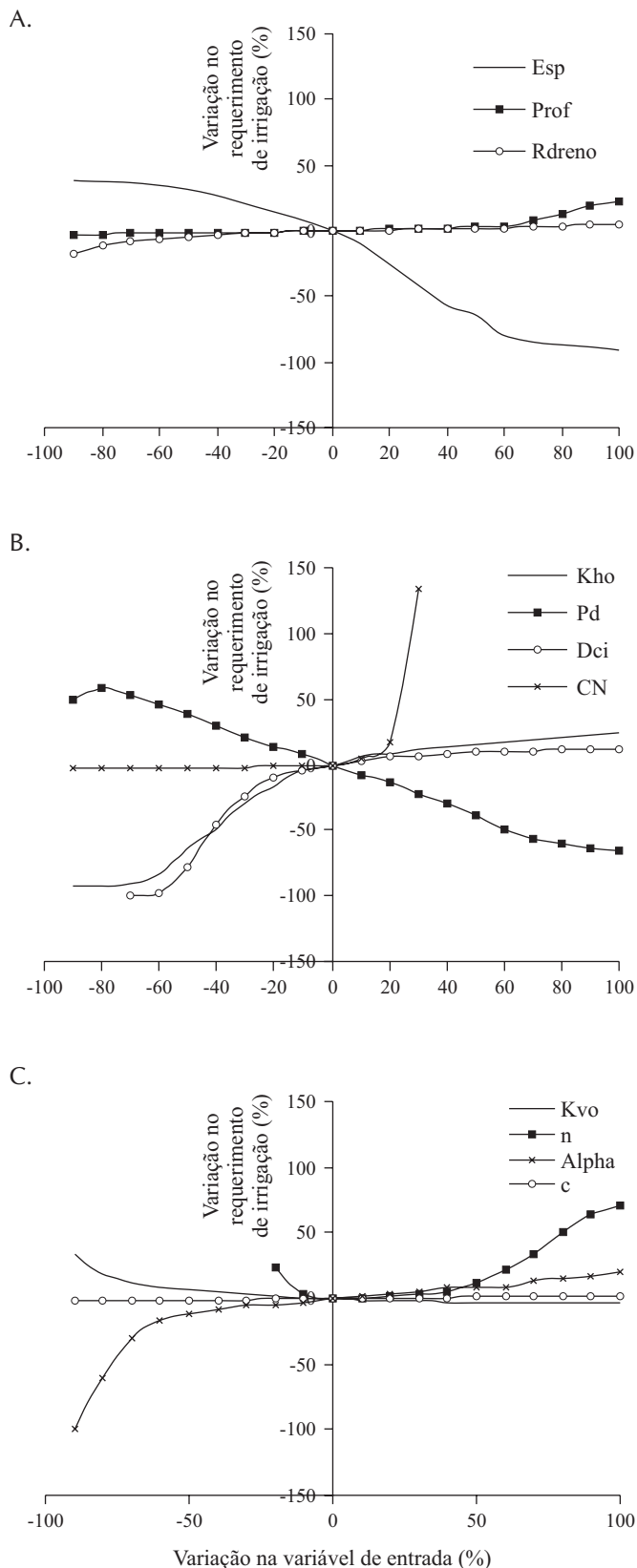


Figura 5. Resultados da análise de sensibilidade para as seguintes variáveis de entrada: (A) espaçamento entre drenos (Esp), profundidade de drenos (Prof) e raio efetivo dos drenos (Rdreno); (B) condutividade hidráulica horizontal do solo saturado (Kho), porosidade drenável (Pd), profundidade da camada impermeável (Dci) e número da curva (CN); e (C) condutividade hidráulica vertical do solo saturado (Kvo) e parâmetros do modelo de van Genuchten-Mualem n , α e c

a elevação do lençol freático após uma recarga; entretanto, conforme modelado na Equação de Kraijenhoff – Maasland, maior será a taxa de rebaixamento do lençol. Maior profundidade do lençol acarreta menor fluxo ascendente e, conseqüentemente, maior uso da água armazenada na zona radicular, o que, ao longo do ciclo, implica em maior requerimento de irrigação. Variações de -80 e 100% em Pd acarretaram variações de 58 e -66% em RI, respectivamente. A variação de -90% em Pd acarretou uma variação em RI inferior à obtida pela variação de -80%, em contradição à tendência da curva; este fato não é lógico dentro da modelagem utilizada. Observa-se, contudo, que o valor de Pd igual a 0,3%, relativo à variação de -90% em relação ao valor da base de dados, é consideravelmente baixo em relação aos valores normalmente encontrados para Pd.

Nota-se, ainda na Figura 5B, que apenas variações positivas do parâmetro número da curva (CN), relativo ao cálculo do escoamento superficial, implicaram em variações expressivas para o requerimento de irrigação. A variação de 20% em CN implicou em uma variação de 17% em RI, enquanto uma variação de 30% em CN acarretou uma variação de 135% em RI, sendo esta a maior variação em RI observada nesse estudo de sensibilidade. Deve-se considerar, no entanto, que o valor de CN relativo à variação de 30% foi igual a 99, próximo ao máximo valor de CN (100), o que implicaria em se considerar que toda a chuva, ao longo de todo ciclo da cultura, seria convertida em escoamento superficial, situação não condizente com a realidade de áreas agrícolas.

Observam-se, na Figura 5C, os resultados da análise de sensibilidade para os parâmetros do modelo de van Genuchten-Mualem. Para variações entre -50 e 50%, as únicas variações expressivas em RI foram relacionadas ao parâmetro n ; uma variação de -20% nesse fator implicou em uma variação de 23% em RI. É interessante observar que a curva de sensibilidade para o parâmetro n , quanto à RI, apresenta um mínimo que, nesse estudo, ocorreu para variações em n entre 0 e 10%.

Conforme se observa na Figura 5C, para maiores amplitudes nas variações dos parâmetros, variações expressivas em RI ocorrem para os parâmetros K_{vo} , n e α . O requerimento de irrigação varia inversamente a K_{vo} , conforme esperado, já que maiores valores de K_{vo} implicam em maiores valores no fluxo ascendente. Variações negativas em α , inferiores a -50%, acarretaram consideráveis variações no RI; a variação de -60% em α acarretou uma variação de -18% em RI, enquanto uma variação de -90% em α implicou em uma variação de -99% em RI. O modelo mostrou-se insensível a variações no parâmetro c , demonstrando a adequação na utilização do valor 0,5 para este parâmetro.

CONCLUSÕES

1. Constatou-se a potencialidade do modelo computacional MCID como ferramenta para a análise, em nível de unidade de produção, dos efeitos de diferentes estratégias de manejo da irrigação e/ou configurações de sistemas de

drenagem na produtividade das culturas e no retorno financeiro, auxiliando na tomada de decisão. A interface gráfica interativa com o usuário propicia a utilização do programa, também, como instrumento de transferência de tecnologia e treinamento.

2. A análise de sensibilidade indicou que os parâmetros de entrada que mais influenciaram o requerimento de irrigação totalizado para o ciclo foram espaçamento entre drenos, porosidade drenável, número da curva, condutividade hidráulica horizontal do solo saturado, profundidade da camada impermeável e os parâmetros n e α do modelo de van Genuchten-Mualem.

3. Para a base de dados considerada, o modelo mostrou-se pouco sensível, em relação à variável de saída requerimento de irrigação, a variações nas variáveis profundidade e raio efetivo de drenos e aos parâmetros K_v e c do modelo de van Genuchten-Mualem.

LITERATURA CITADA

- Abbott, C. L.; Leeds-Harrison, P. B. Research priorities for agricultural drainage in developing countries. TDR Project R6879, Report OD/TN92. Cranfield University, DFID-Department for International Development. Wallingford: HR Wallingford 1998. 17p.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. Rome: F.A.O., 1998. 300p. Paper 56.
- Bernardo, S. Manual de irrigação. 7.ed. Viçosa: UFV, 2005. 611p.
- Borges Júnior, J. C. F. Modelo computacional para tomada de decisão em agricultura irrigada. Viçosa: UFV, 2004. 250p. Tese Doutorado
- Borges Júnior, J. C. F.; Ferreira, P. A.; Pruski, F. F.; Silva Júnior, A. G. Sistemas de drenagem agrícola. Parte I: Desenvolvimento do modelo e análise de sensibilidade. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.5, n.3. p.369-375, 2001.
- Borges Júnior, J. C. F.; Hedden-Dunkhorst, B.; Ferreira, P. A. Decision support based on bio-economic simulations for irrigated agriculture. Deutscher Tropentag – Technological and institutional innovations for sustainable rural development. <http://www.tropentag.de/2003/abstracts/full/224.pdf>. 2003. 11 Jun. 2007.
- Borges Júnior, J. C. F.; Mantovani, E. C. Desenvolvimento de um programa para a avaliação da irrigação por sistemas pressurizados. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa em Cafeicultura Irrigada, 2001, Araguari. Anais... Araguari: UFV, 2001. p.42-48.
- Cai, X.; McKinney, D. C.; Lasdon, L. S. Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management. Journal of Water Resources Planning and Management, Austin, v.129, n.1, p.4-17, 2003.
- Evans, R. O.; Fausey, N. R. Effects of inadequate drainage on crop growth and yield. In: Skaggs, R.W.; van Schilfhaarde, J. (eds.) Agricultural drainage. Wisconsin: Madison, 1999. cap.2, p.13-54.
- Ferreira, P. A. Drenagem. In: Curso de Engenharia de Irrigação. Módulo XI. Brasília: ABEAS. 2001. 167p.
- Garcia, L. A.; Manguerra, H. B.; Gates, T. K. Irrigation-drainage design and management model: development. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Delaware, v.121, n.1, p.71-82, 1995.
- Gowda, P.; Ward, A.; White, J. L.; Desmond, E. The sensitivity of ADAPT model predictions of streamflows to parameters used to define hydrologic response units. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.42, n.2, p.381-389, 1999.
- Hardjoamidjojo, S.; Skaggs, R. W.; Schwab, G. O. Corn yield response to excessive soil water conditions. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.25, n.3, p.922-927, 1982.
- Hazell, P. B. R.; Norton, R.D. Mathematical programming for economic analysis in agriculture. New York: Macmillan Publishing Company, 1986. 400p.
- Keller, J.; Bliessner, R. D. Sprinkle and trickle irrigation. New York: Avibook, 1990, 649p.
- Kraijenhoff van de Leur, D. A. A study of non-steady groundwater flow with special reference to a reservoir-coefficient. De Ingenieur, Utrecht, v.70, n.19, p.87-94, 1958.
- Mualem, Y. A New model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, Washington, v.12, n.3, p.513-522, 1976.
- Nunes, W. A. G. A. Efeitos da irrigação com água de poços tubulares e do Rio Gorutuba sobre propriedades de solos da região de Janaúba-MG. Viçosa: UFV, 2003. 167p. Tese Doutorado
- Pizarro, F. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Madrid: Agrícola Española, 1985. 521p.
- Prajamwong, S.; Merkle, G. P.; Allen, R. G. Decision support model for irrigation water management. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Delaware, v.123, n.2, p.106-113, 1997.
- Simunek, J.; van Genuchten, M. T.; Šejna, M. The HIDRUS 1-D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Riverside: U.S. Salinity Laboratory, 2005. 240p.
- Skaggs, R. W. Drainage Simulation Models. In: Skaggs, R. W.; van Schilfhaarde, J. (eds.) Agricultural Drainage. Wisconsin: Madison, 1999. cap. 13, p. 469-500.
- Soil Conservation Service, USDA. National engineering handbook. IV. Hydrology. Washinton, D.C.: USDA.1972. n.p.
- Tarjuelo, J. M.; Juan, J. A. Crop water management. In: van Lier, H. N.; Pereira, L. S.; Steiner, F. R. (eds.) CIGR handbook of agricultural engineering: Land and water engineering. St. Joseph: ASAE, 1999, cap. 5.5, p.380-429.
- van Genuchten, M. T. A closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society American Journal, Madison, v.44, n.3, p.892-898, 1980.