

Avaliação de Alternativa de Irrigação Suplementar com Água Moderadamente Salina em Vale Aluvial no Semi-Árido: Experimentação e Modelagem

Danilo César de Oliveira Bastos

Faculdade da Amazônia, Departamento de Agronomia/IESP/RO

<http://www.iesavilhe.edu.br>

Abelardo A. de A. Montenegro, Suzana M. Gico Lima Montenegro

Departamento de Tecnologia Rural- UFRPE

monte@hotlink.com.br ; suzanam@pq.cnpq.br

Recebido: 11/07/08 - revisado: 30/06/09 - aceito: 04/08/09

RESUMO

A avaliação de alternativas de manejo da irrigação com águas salobras é fundamental para a prática da agricultura de maneira sustentável no semi-árido. Desenvolveu-se estudo em lote de vale aluvial irrigado por microaspersão e cultivado com cenoura (*Daucus carota* L.), no início da estação chuvosa, onde existe risco de salinização, associado à qualidade das águas subterrâneas utilizadas para irrigação. O desempenho do manejo de irrigação com água moderadamente salina ($CE = 1,38 \text{ dS m}^{-1}$) foi avaliado com base em lavagem parcial de sais, na manutenção de níveis adequados de umidade e de salinidade no perfil. Verificou-se redução da condutividade elétrica no perfil 0-100 cm durante o cultivo, principalmente na zona radicular. Simulação numérica de fluxo e transporte de sais foi então realizada, tendo-se reproduzido aproximadamente as medições de campo, com relação às tensões matriciais e ao conteúdo de sais no perfil do solo. Verificou-se, experimentalmente e através de modelagem, que a alternativa de lixiviação incompleta apresentou desempenho adequado, quando comparada com a lixiviação completa, baseada na salinidade da água de irrigação e na tolerância da cultura. A alternativa de lixiviação incompleta preservou as condições adequadas para desenvolvimento da cultura, ao mesmo tempo em que promoveu economia no uso da água.

Palavras-chave: lixiviação incompleta, modelagem numérica, salinidade, cenoura.

INTRODUÇÃO

A região semi-árida nordestina, embora possua alto potencial para agricultura, apresenta regime irregular de chuvas e elevada taxa de evaporação, com vales aluviais, via de regra, apresentando salinidade elevada. O desenvolvimento da irrigação nesses vales, particularmente da agricultura familiar, em geral carente de suporte técnico e de capacitação, está associado a um elevado risco de salinização da água e do solo.

A lavagem dos sais do perfil é essencial para adequada produtividade das culturas sensíveis em áreas com águas marginais, particularmente no semi-árido. Medeiros & Gheyi (1997) recomendam o modelo de Rhoades (1974) para estimativa da necessidade de lavagem do solo. Tomando-se por refe-

rência tais valores, verificações experimentais devem ser conduzidas, ou, alternativamente, simulações numéricas, que considerem a resposta da cultura à salinidade. Por exemplo, o modelo WAVE (Vancloster et al., 1994) foi utilizado por Montenegro et al. (2002) para análise de risco de salinização em solo com lençol freático raso. Neste caso, as águas subterrâneas recebem aportes da drenagem do perfil, e a lavagem excessiva pode comprometer a qualidade desses mananciais (Causapé et al., 2004).

Com relação à cultura da cenoura, é grande a carência de estudos sobre os efeitos de estresse salino no seu rendimento, aceitando-se, comumente, os valores de coeficientes propostos por Maas & Hoffman (1977) para salinidade limiar e taxa de redução de produtividade. Souza et al. (2008), em experimento de irrigação na mesma área objeto deste estudo, verificaram adequada produtividade

da cenoura, utilizando água moderadamente salina e lâmina de lixiviação reduzida.

Ayers & Westcot (1999) ressaltam que nos cálculos das necessidades de lixiviação faz-se necessário considerar as precipitações no período, as quais são capazes de suprir parte das necessidades de lixiviação, permitindo a adoção de lâminas de irrigação inferiores às recomendadas para os períodos secos.

O presente estudo tem por objetivo avaliar o potencial da irrigação suplementar e de frações de lixiviação reduzidas sobre a salinidade do perfil de solo com cultura sensível à salinidade, e sobre a distribuição das tensões e fluxos resultantes, em período anterior ao início da estação chuvosa.

ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi desenvolvida em um lote da Fazenda Nossa Senhora do Rosário, município de Pesqueira – PE (Figura 1). Na Fazenda, foram assentadas cerca de 50 famílias desde dezembro de 1991. O assentamento é situado em um vale aluvial que se desenvolve a partir da Serra do Mimoso, onde as áreas de menor inclinação tendem a acumular sedimentos finos na sub-superfície. O aquífero aluvial é raso, com profundidade média de 10 m, possuindo cerca de 15 km de extensão e 300m de largura, na bacia do Alto Ipanema.

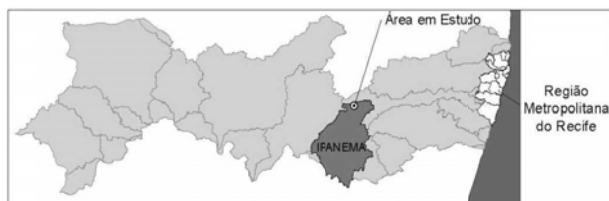


Figura 1- Localização da área em estudo (Pesqueira), mapa de Pernambuco com divisão de bacias hidrográficas.

A área está situada entre as coordenadas geográficas 08° 10' 25" S e 35° 11' 25" W, e 650 m de altitude. O clima do local é classificado, segundo Köppen, como BShw' semi-árido quente, com temperatura média anual de 27 °C, precipitação anual média de 600 mm, e umidade relativa média anual do ar de 73% (CISAGRO, 1990).

A maior parte da Fazenda Nossa Senhora do Rosário está situada no terraço fluvial do Rio Ipanema, formado por sedimentos aluviais de textura variada, com maior parte do solo classificada em Neossolo Flúvico e Neossolo Regolítico, como

mostra a Tabela 1. O solo no lote em estudo foi classificado como Neossolo Flúvico, referenciado como RU4.

Tabela 1 - Unidades de mapeamento na área em estudo (Ribeiro e Corrêa, 2001)

CLASSE DE SOLO	ÁREA	
	ha	%
RR1-NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico + NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico ambos fase relevo suave ondulado	25	23
RR2-NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico solódico textura média (leve) fase relevo plano e suave ondulado	12	11
RU1-NEOSSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico textura arenosa ou média (leve)/média (leve) ou arenosa moderadamente drenado	25	23
RU2-NEOSSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico textura média/média (leve) ou arenosa moderadamente drenado	12	11
RU3-NEOSSOLO FLÚVICO Sódico típico textura média (leve)/média moderadamente drenado	4	3
RU4-NEOSSOLO FLÚVICO Sódico típico textura média/média ou arenosa moderadamente drenado	6	6
RU5-NEOSSOLO FLÚVICO Sódico salino textura média/média (leve) ou média imperfeitamente drenado	7	6
RU6-NEOSSOLO FLÚVICO Sálco sódico textura média imperfeitamente drenado	18	17

A área é dotada de estação climatológica automática, pluviômetros manuais e Tanque Classe "A". Monitorou-se lote de 2235 m², com microaspersão, cultivado com cenoura (*Daucus carota* L.), e irrigado a partir de poço Amazonas, cuja vazão média é de 4,50 m³ h⁻¹. Segundo média histórica, a condutividade elétrica média é de 1,38 dS m⁻¹, e desvio-padrão de 0,25 dS m⁻¹, com base em registros mensais de janeiro de 2000 a dezembro de 2002. A razão de adsorção de sódio (RAS) da água é inferior a 6 (mmol_c L⁻¹)^{1/2}. O microaspersor fornece a vazão de 43 L h⁻¹, para uma pressão de operação de 150 kPa, gerando intensidade de aplicação média de 3,58 mm.h⁻¹, conforme Santiago et al. (2004). Durante o período de experimento, a condutividade elétrica da água do poço foi inferior à média histórica, e igual a 1,29 dS m⁻¹.

SALINIZAÇÃO E CONTROLE

Observando-se o manejo de irrigação exercido pelos agricultores, verificou-se que há uma tendência para aplicação da lâmina de irrigação superior às necessidades da planta, por seguirem o princípio de que a produção irá responder melhor à lâmina aplicada em excesso. Isso poderá ocasionar um acúmulo de sais devido à alta condutividade elétrica da água de irrigação.

Segundo Ferreira (1998), o processo de salinização do solo pode ser ocasionado por dois

processos: o natural e o induzido. O processo induzido ocorre pela ação antrópica, provocando a salinização do solo pelo manejo inadequado da irrigação e drenagem em regiões áridas e semi-áridas, fazendo-se muitas vezes do uso da água com salinidade elevada ou aplicação de lâmina excessiva às necessidades da planta e drenagem deficiente, com acúmulo de sais após ascensão capilar e evapotranspiração da água na zona radicular.

Conforme destacam Ribeiro et al. (2003), a presença de lençol livre próximo à superfície está não só associada a uma drenagem reduzida, mas também à utilização de sistemas de irrigação ineficientes. O acúmulo de sais na zona não-saturada é intensificado pela salinização secundária. As regiões saturadas de um perímetro, onde os fluxos ascendentes predominam, são conhecidas como regiões de descarga (Salama et al., 1993).

A Figura 2 apresenta um modelo esquemático do fluxo e transporte de sais em aluviões irrigados, com lençol freático raso. Pode-se notar que o ciclo progressivo pode causar o acúmulo de sais, constituído pelos componentes, irrigação-lixiviação-bombeamento-irrigação e, nas áreas propensas a descargas, irrigação-lixiviação-ascensão.

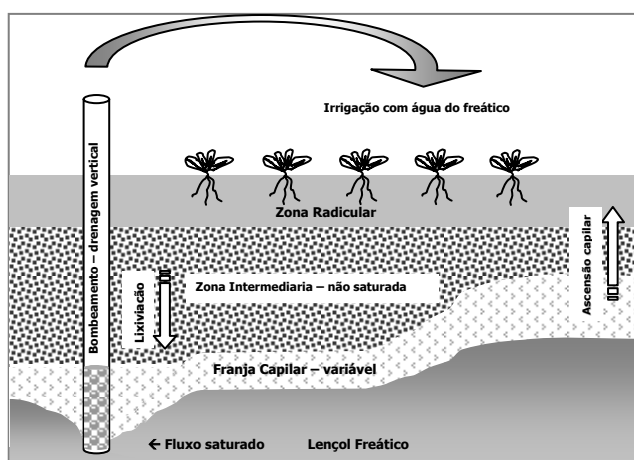


Figura 2 - Modelo conceitual do risco de salinização de solo e aquífero decorrente de irrigação

Segundo Ayers & Westcot (1999), a cultura da cenoura apresenta limiar de condutividade elétrica do extrato saturado de $1,0 \text{ dS m}^{-1}$. A necessidade de lavagem pode ser estimada aplicando-se o modelo de Rhoades (1974), dado por:

$$NL = \frac{CE_a}{5CE_{es} - CE_a} \quad (1)$$

em que CE_a é a condutividade elétrica da água de irrigação, e CE_{es} é a condutividade elétrica do extrato saturado, equivalente ao limiar da cultura. Com base na lâmina de irrigação adotada e na necessidade de lavagem NL, pode-se facilmente estimar a lâmina de drenagem LD associada.

O extrato de saturação representa o menor teor de umidade do solo que pode ser repetido com certa segurança e relativa facilidade, possibilitando a coleta de volumes adequados razoáveis de líquido para análises. Os valores de parâmetros analíticos obtidos no extrato de saturação geralmente apresentam alta correlação com os medidos na condição de umidade natural do solo. Por este motivo, a tolerância das culturas à salinidade é relacionada à condutividade elétrica, ou concentração total de eletrólitos do extrato de saturação.

EXPERIMENTO DE CAMPO

As lâminas de irrigação foram aplicadas aproximadamente a nível diário, utilizando-se as leituras de evaporação do Tanque Classe A e as precipitações no período. Adotou-se, para todo o ciclo da cultura, o valor de 0,75 referente ao coeficiente de tanque (K_p), conforme Doorembos & Kassam (1979), para as condições locais. Nos dias de chuva, as estimativas de evapotranspiração do tanque foram posteriormente ajustadas aos valores calculados pelo modelo de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Quatro estágios de desenvolvimento da cultura foram considerados, conforme Doorembos & Kassam (1979). Os 1º, 2º, 3º e 4º estágios ocorreram nos intervalos de 10 a 28/02/2003 ($K_c = 0,45$), 01 a 30/03/2003 ($K_c = 0,75$), 31/03 a 29/04/2003 ($K_c = 1,05$), e 30/04 a 15/05/2003 ($K_c = 0,90$), respectivamente. Devido à ocorrência de chuvas durante o estágio 1 (69,0 mm), que superaram a demanda hídrica da cultura (42,6 mm), a irrigação teve início apenas a partir do 2º estágio de cultivo.

Amostras de solo foram coletadas para avaliação da CE do extrato de saturação do solo, conforme metodologias recomendadas por EMBRAPA (1997).

Tendo em vista que os agricultores locais tendem a aplicar lâminas mais elevadas nos estágios iniciais das culturas e depois reduzir as lâminas com vistas à economia de energia elétrica, propôs-se uma necessidade (ou fração) de lavagem de 0,38 apenas para os 15 primeiros dias do 2º estágio, deixando-se a cargo do agricultor local conduzir o manejo a partir das leituras evaporimétricas, sob supervisão. Para os períodos subseqüentes, sugeriu-se suspender as lavagens utilizando-se a água de irrigação, de modo a avaliar o potencial das chuvas em promover naturalmente as lixiviações.

De modo a estimar as lâminas drenadas do perfil, utilizou-se a equação do balanço hídrico aplicada a um perfil de solo de altura igual à profundidade da zona radicular efetiva, desprezando-se o escoamento superficial, e com a variação de umidade na zona radicular limitada ao teor de capacidade de campo do solo.

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DO SOLO

Estabeleceu-se uma malha com 12 pontos na área em estudo, de modo a monitorar a salinidade do solo no decorrer do experimento, nas profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm e 80-100 cm. Em quatro desses pontos, instalaram-se tensiômetros nas mesmas profundidades e cápsulas, para extração de solução do solo. Avaliou-se a densidade global e a curva característica do solo a partir de amostras indeformadas. Os resultados de laboratório foram ajustados ao modelo de van Genuchten (1987), dado por:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha \Psi)^n\right]^{1 - \frac{1}{n}}} \quad (3)$$

em que θ_s e θ_r são as umidades de saturação e residual, respectivamente, e α e n parâmetros. Em uma das estações foram realizados testes com permeâmetro de Guelph, para avaliar os parâmetros da função de Gardner (1958), para a curva de condutividade hidráulica não saturada, especificamente a condutividade hidráulica saturada K_0 e o parâmetro exponencial a , de acordo com:

$$K(\Psi) = K_0 \cdot e^{-a \cdot \Psi} \quad (4)$$

em que $K(\Psi)$ [L/T], é a condutividade hidráulica em função do potencial matricial.

MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo escolhido para a análise numérica foi o WAVE (Vanclooster et al., 1994), que se baseia na equação de Richards e na equação de convecção-dispersão para a solução de problema de fluxo de água e transporte de soluto na direção vertical de uma coluna de solo. A equação de Richards na forma como é utilizada no modelo é escrita como

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{1}{C(\Psi)} \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\Psi) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \right] - \frac{S(\Psi)}{C(\Psi)} \quad (5)$$

com:

Ψ =potencial matricial [L];

t =tempo [T];

$K(\Psi)$ = função de condutividade hidráulica do solo [L/T];

z = coordenada vertical [L];

$S(\Psi)$ = função de extração da água do solo pela planta, em relação ao potencial matricial [T⁻¹];

$C(\Psi)=d\theta/d\Psi$ = capacidade específica de água [L⁻¹].

A equação de convecção-dispersão considerada no modelo é:

$$\frac{\partial (\theta C)}{\partial t} + \frac{\partial (v \theta C)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (6)$$

com:

θ = conteúdo de umidade do solo [L³/L³];

C = concentração de soluto [M/L³];

v = velocidade da água no meio poroso [L/T];

D = coeficiente de dispersão longitudinal [L²/T].

Assume-se que o coeficiente D é escrito como $D=\lambda_1 v$, onde λ_1 é o coeficiente de dispersividade hidrodinâmica. Para o estudo proposto, a concentração de soluto, C , é tomada como o total de sólidos dissolvidos, representando a concentração de sais em solução na água, e o soluto é considerado inerte.

A função $S(\Psi)$ é definida no WAVE de acordo com modelo proposto por Feddes et al. (1978), escrito como

$$S(\Psi) = \alpha(\Psi) \cdot S_{\max} \quad (7)$$

onde, S_{\max} é a máxima extração de água pela planta, que ocorre em condições ótimas de umidade, e $\alpha(\Psi)$ é uma função adimensional de redução em resposta a uma condição não favorável de umidade, relacionada ao potencial matricial, Ψ . No modelo WAVE a função S_{\max} é dada por

$$S_{\max} = a_0 - bz \quad (8)$$

em que, a_0 e b são parâmetros que devem ser preferencialmente determinados através de experimentos, ou adotados valores da literatura. A função da equação 8 representa o padrão de extração da água pelas raízes ao longo da profundidade da zona radicular.

A função $\alpha(\Psi)$ é considerada no modelo WAVE de acordo com a proposição de Feddes et al. (1978) como dependente de quatro parâmetros, Ψ_0 , Ψ_1 , Ψ_2 e Ψ_3 . O valor de Ψ_0 reflete as condições de deficiência de oxigênio para a planta, quando o nível de umidade do solo é alto, enquanto Ψ_3 caracteriza a condição de estresse hídrico, ou de escassez de umidade, que prejudica o desenvolvimento da planta de forma irreversível, representado pelo ponto de murcha permanente. Os valores de Ψ_0 e Ψ_3 caracterizam valores-limite de tensão de água no solo, ou de pressão matricial, para que a extração de água pela planta cesse. Para valores de Ψ superiores a Ψ_0 e inferiores a Ψ_3 , a função de redução $\alpha(\Psi)$ assume o valor zero. Entre Ψ_1 e Ψ_2 a planta teria condições ótimas de umidade e o valor de α é igual à unidade. No intervalo entre Ψ_0 e Ψ_1 , uma variação linear de α é assumida. Uma opção de variação linear ou hiperbólica pode ser assumida para α entre Ψ_2 e Ψ_3 . Nesse trabalho, uma variação linear foi adotada nesse intervalo. A função de extração de água pelas raízes, $S(\Psi)$ também pode refletir a influência da presença de sais no processo de transpiração. Nesse caso, a função é $S(\Psi, \pi)$, sendo π o potencial osmótico, relacionado com a presença de sais na solução da água no solo. van Genuchten (1987) propôs uma expressão para $\alpha(\Psi, \pi)$ considerando o efeito do potencial osmótico. No presente estudo, esse efeito não foi considerado pela dificuldade de definição dos parâmetros adequadamente, tendo-se optado por assumir que o efeito da presença de sais pode ser incorporado na

função da equação 7 quando da calibração do modelo.

O modelo considera que a extração de água pelas raízes integrada ao longo do comprimento da zona radicular, z_r , é limitada ao valor da transpiração

máxima $\left(\int_0^{z_r} S(\Psi, z) \leq T_p \right)$. A transpiração máxima T_p é

calculada por um modelo de repartição da evapotranspiração máxima da cultura escrito como

$$E_p = \exp(-0,6 \cdot \text{IAF}) \cdot ET_p \quad (9)$$

com:

E_p = evaporação potencial;

IAF = índice de área foliar;

ET_p = evapotranspiração máxima da cultura.

A evapotranspiração máxima da cultura no modelo WAVE pode ser calculada através de valores fornecidos de evaporação do Tanque Classe "A" e coeficiente de cultura.

O modelo WAVE discretiza as equações 5 e 6 através do Método das Diferenças Finitas. Para a solução da equação 5 é necessário o conhecimento da curva característica do solo, $\theta(h)$, e da condutividade hidráulica como função do potencial matricial ou da umidade ($K(\Psi)$ ou $K(\theta)$). Nesse trabalho, foram assumidas as relações funcionais dadas por (3) e (4).

Na pesquisa em questão foi simulada a seguinte situação de perfil:

- Solo com 5 camadas (0-120 cm), sendo cada compartimento com 10cm, no total de 12;
- Irrigação durante 95 dias.
- As simulações foram realizadas considerando as condições de tensão especificada no contorno inferior do perfil.

O modelo WAVE tem sido amplamente utilizado para simulação do fluxo e transporte de sais em meios porosos. Montenegro et al. (2002) aplicaram o modelo em análise estocástica na mesma área de estudo. Fernández et al. (2002) aplicaram o WAVE a condições do Mediterrâneo e verificaram o bom desempenho do modelo. Bastiaanssen et al. (2007) apresentam uma revisão do estado da arte com relação a 25 anos de modelagem em solos sob condições de irrigação e drenagem e destacam o WAVE na listagem dos principais modelos disponíveis.

Neste estudo foram utilizados os parâmetros recomendados por Montenegro et al. (2002) para as funções das equações (7), (8) e (9). O coeficiente de dispersão hidrodinâmica foi escolhido igual a 3 cm, com base em experimentos com solos da área, também reportado por Montenegro et al. (2002). Os dados da cultura de índice de área foliar e profundidade das raízes foram de 5 e 40 cm, respectivamente, obtidos da literatura (Hoogland et al., 1981; CISAGRO, 1990) e variando linearmente de zero, no início do ciclo da cultura até esses valores máximos aos 45 dias de cultivo.

Tabela 2 - Textura e classes do solo, no lote aluvial estudado.

Profundidade (cm)	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)	Classe do solo
0-20	37,05	25,92	37,03	Franco
20-40	48,52	24,01	27,47	Franco-argilo-arenoso
40-60	52,66	21,95	25,39	Franco-argilo-arenoso
60-80	55,60	22,48	20,71	Franco-argilo-arenoso
80-100	49,35	25,51	27,14	Franco-argilo-arenoso

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os solos são de classe franco a franco-argilo-arenosa, com teores de areia aumentando de 37,05% na superfície, até 55,60% na camada de 60-80 cm (Tabela 2). A Tabela 3 apresenta os parâmetros para os modelos de van Genuchten (1987) e Gardner (1958). As camadas apresentam condutividade hidráulica saturada de alta a muito alta, o que facilita os processos de lixiviação de sais, sendo levemente superiores, a partir de 20 cm de profundidade, ao valor de $9,2 \text{ mm.h}^{-1}$ encontrado por Santiago et al. (2004), em perfil próximo. Os valores do parâmetro a se situam aproximadamente na faixa indicada por Reynolds et al. (1985), da ordem de 10 a 20 m^{-1} para solos arenosos e franco arenosos e da ordem de 1 a 2 m^{-1} para solos francos. Assumiu-se que a salinidade da água não alterou as proprieda-

des hidráulicas do solo durante o experimento, com base nas faixas de CE e RAS verificadas por Silva et al. (2005), em Neossolo no Ceará.

Tabela 3 - Parâmetros para a curva característica e função de condutividade hidráulica

	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm
n	1,7030	1,4321	1,2824	1,1810
$\alpha \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	0,0011	0,0172	0,0438	0,0606
θ_r	0,1550	0,1377	0,1123	0,0173
$K_0 \text{ (mm h}^{-1}\text{)}$	7,0208	39,6458	41,8125	22,6583
$a \text{ (m}^{-1}\text{)}$	2,7130	4,1300	5,0800	2,1300
θ_s	0,3650	0,4100	0,3970	0,4280

* R^2 : Coeficiente de determinação do ajuste estatístico superior a 0,95

A Figura 3 apresenta as lâminas precipitadas (P), de irrigação (I), e evapotranspirada pela cultura (ET), a nível diário. As lâminas de drenagem (LD) foram acumuladas no tempo, resultantes da precipitação e da irrigação. Para o manejo adotado, as lavagens promovidas pelas irrigações corresponderam a apenas 24% do total previsto pelo modelo de Rhoades (1974). Conforme já comentado, verificou-se que a condutividade elétrica da água de irrigação esteve abaixo da média histórica, com valor de $1,29 \text{ dS m}^{-1}$. Utilizando-se este último valor, pode-se calcular a lâmina de drenagem $LD(\text{req})_2$, e a necessidade de lavagem seria inferior à previamente calculada, $LD(\text{req})_1$, com base na média histórica, conforme mostrado na Figura 3.

Para as condições experimentais de cultivo, a redução na lavagem de sais correspondeu a uma lâmina de aproximadamente 23 mm, ou seja, $230 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Quando se compara a drenagem real com aquela prevista pelo modelo de Rhoades (1974), pode-se notar que as lavagens devidas à irrigação foram praticamente suspensas decorridos cerca de 15 dias de iniciada a irrigação, correspondendo aos trechos horizontais no gráfico acumulado. As lavagens subseqüentes estão relacionadas às chuvas.

Através da Figura 4 pode-se verificar que, em todas as profundidades, ocorreu decréscimo na concentração de sais após a irrigação acompanhada da lâmina de lixiviação, sendo aos 60cm de profundidade os menores valores encontrados, acumulando-se nesse perfil intermediário entre a camada das raízes das plantas e o lençol freático, como proposto no manejo.

Avaliaram-se os potenciais matriciais através de tensiômetros, entre 20/03 e 15/05, não se verificando estresses matriciais significativos, capazes de reduzir a transpiração da cultura ou inibir o seu crescimento. Leituras anteriores a 20/03 não foram analisadas, devido a dificuldades no funcionamento dos tensiômetros; entretanto, tendo em vista que se promoveu lavagem por irrigação entre 02 e 15/03, pode-se considerar que não ocorreram estresses hídricos neste intervalo.

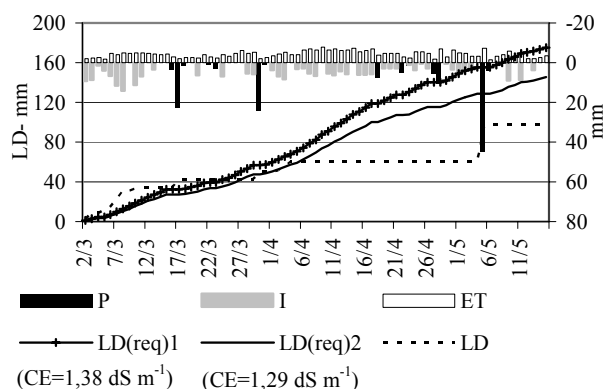


Figura 3 - Lâminas de precipitação (P), irrigação (I), evapotranspiração (ET), de drenagem real (LD), e de drenagem teórica LD(req), no experimento com cenoura.

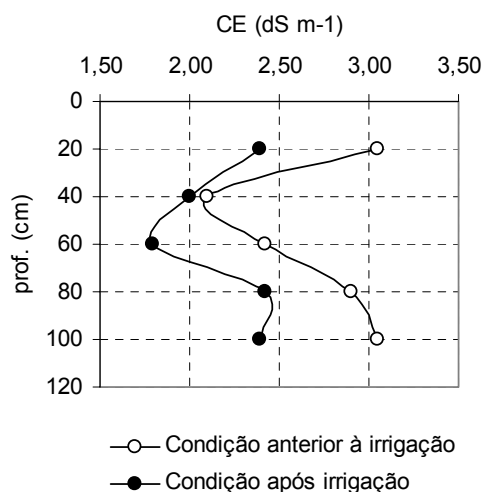


Figura 4 - Evolução da condutividade elétrica do extrato saturado (CEas).

Examinando-se os dados de gradiente de potencial total do experimento, o valor médio entre as camadas 60cm-80cm foi de +1,13, com valores

entre +0,77 e +1,38, indicando drenagem próximo da gravitacional. Valores de gradiente próximos à unidade tendem a se estabelecer abaixo da zona radicular em solos homogêneos e na ausência de lençol raso, conforme Libardi (2000). Adicionalmente, não se detectou fluxo ascendente na camada de 80-100 cm podendo-se descartar, assim, qualquer influência de ascensão capilar.

As lavagens do perfil reduziram a condutividade elétrica, quando comparados os dias 12/02 (início do cultivo) e 14/05 (final do experimento). A Figura 5 mostra as condutividades elétricas medidas a partir de extratos de pasta, com valores corrigidos para a umidade do solo coletado. Os desvios-padrão estão apresentados em conjunto com os valores médios para a pasta. A Figura 5 também inclui as condutividades elétricas simuladas com o WAVE. Nota-se uma tendência de redução da condutividade elétrica entre o início e o final do experimento, por efeito de lixiviação. Em relação ao perfil, a condutividade elétrica a 20 cm apresenta valores superiores, em comparação à 40 cm, provavelmente pelo efeito da evaporação na superfície do solo.

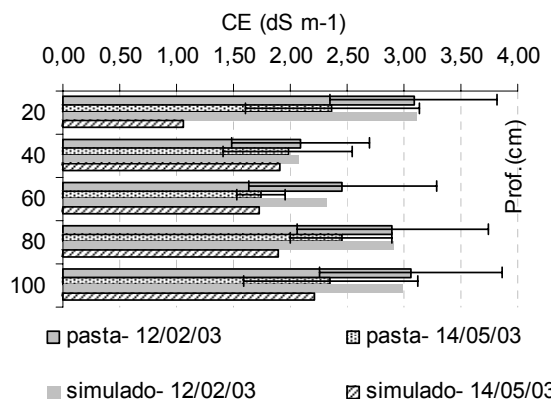


Figura 5 - Condutividades elétricas do perfil medidas (barras indicam desvio padrão) e simuladas no lote

O desempenho das simulações com o modelo WAVE foi verificado mediante a comparação entre as tensões matriciais e as condutividades elétricas simuladas e medidas, para um período de 95 dias, ao longo do perfil e se considerando uma discretização numérica vertical de 10 cm. Os parâmetros de solo de maior relevância utilizados são aqueles presentes na Tabela 3.

Segundo a Figura 5, os valores de condutividade elétrica simulados estão consistentes com os

medidos, no início e no final do experimento. Para os potenciais matriciais, entre os compartimentos 1-3, que equivalem às profundidades de 10-30 cm, ocorreram algumas discrepâncias devido à maior interferência da superfície e à evaporação do solo e transpiração da cultura. Mesmo assim, observou-se coerência de valores e a manutenção de tendências de umedecimento e secamento. As simulações para os compartimentos 4-6 também exibiram tendência similar às de campo. A Figura 6 apresenta as comparações, para a camada de 10-30 cm. Decidiu-se, assim, não se realizar calibração de parâmetros.

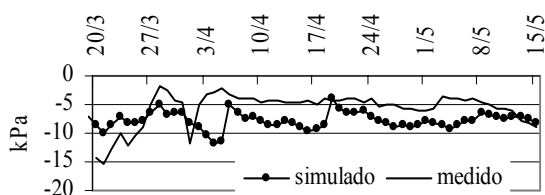


Figura 6 - Potenciais matriciais medidos e simulados, entre os compartimentos 1-3.

Baseado no desempenho do modelo WAVE para as condições do estudo, o mesmo foi utilizado para simular a condição de lixiviação completa, adotando-se o critério de Rhoades (1974). A distribuição de frequência de condutividades elétricas, no perfil 0-100 cm, é similar àquela referente à lavagem incompleta (Figura 7). Porém, na lâmina completa o volume de sais adicionado é maior, incrementando a carga de sais ao lençol freático e, em longo prazo, podendo produzir aumento na salinidade da água do poço.

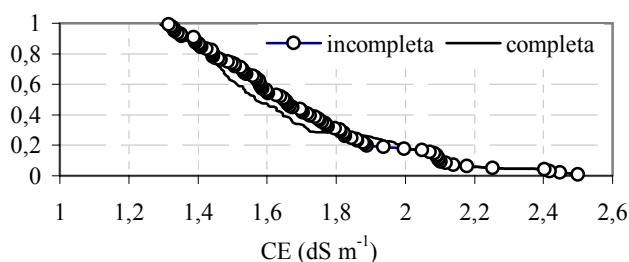


Figura 7 - Distribuição de frequência acumulada da salinidade do perfil 0-100 cm, para as alternativas de lixiviação completa e incompleta

CONCLUSÕES

1. O manejo adotado no início da estação chuvosa e com lâminas de lavagem inferiores a 24% da teórica, promoveu uma lavagem adequada do perfil.
2. O modelo WAVE, parametrizado a partir de levantamentos físicos e hidráulicos de campo, simulou adequadamente a distribuição das tensões e da salinidade do solo.
3. A lixiviação incompleta gerou distribuição de sais similares à lixiviação teórica, tendo reduzido o consumo hídrico para irrigação, e diminuído o transporte de sais para o lençol freático subjacente.
4. Para as condições experimentais de cultivo irrigado, a lixiviação incompleta propiciou uma economia de 230 m³ha⁻¹ dos recursos hídricos disponíveis.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio à realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300p. FAO. Irrigation and Drainage, Paper 56
- Ayers, R.S.; Westcot, D.W. A qualidade da água na agricultura Tradução: Gheyi, H. R.; Medeiros, J.F.; Damasceno, F.A.V. Campina Grande: UFPB, 1999. 153p. Estudos FAO, Irrigação e Drenagem, 29.
- Bastiaanssen, W.G.M., Allen, R.G., Droogers, P., D'Urso, G., Steduto, P. Twenty-five years modeling irrigated and drained soils: State of the art. Agricultural Water Management, Amsterdam, v.92, p.111-125, 2007
- Causapé, J.; Quílez, D.; Aragüés, R. Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level II. Salt and nitrate loads in irrigation return flows. Agricultural Water Management, Amsterdam, v.70, p.211-228, 2004

- CISAGRO (Companhia Integrada de Serviços Agropecuários). Projeto de Irrigação da Fazenda Nossa Senhora do Rosário. Pesquisa: CISAGRO, 1990. 120 p.
- Doorembos, J.; Kassam, A.H. Efectos del agua en al rendimiento de los cultivos. Riego y Drenage, 33. Roma: FAO, 1979. 212 p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento de Solos (Rio de Janeiro). Manual de métodos da análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- Feddes, R. A. Kowalik, P. J.; Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. PUDOC. Wageningen, 189p.
- Fernández, J. E.; Slawinski, C.; Moreno, F.; Walczak, R. T.; Vanclooster, M., Simulating the fate of water in a soil-crop system of a semi-arid Mediterranean area with the WAVE 2.1 and the EURO-ACCESS-II models. Agricultural Water Management, v.56, p.113-129, 2002
- Ferreira, P.A. Manejo de água – planta em solos salinos. Curso de pós-graduação em Engenharia Agrícola. UFV/DEA. Viçosa, 93p. 1998.
- Gardner, W.R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from water table. Soil Science, Baltimore, v.85, n.2, p.228-32, 1958.
- Hoogland, J.C.; Feddes, R.A.; Belmans, C. Root water uptake model depending on soil water pressure head and maximum extraction rate. Acta Horticulturae, Wageningen, v.119, n.1, p.123-131, 1981.
- Libardi, P.L. Propriedades físico-hídricas do solo no estudo do manejo e da conservação do solo e da água. In: Oliveira, T.S.; Assis, R.N.; Romero, R.E.; Silva, J.R.C. Agricultura, sustentabilidade e o semi-árido. Fortaleza: UFC, 2000. p.214-223.
- Maas, E.V.; Hoffman, G.J. Crop salt tolerance: current assessment. J. Irrigation and Drainage Division, New York, v.103, n.1, p.115-134, 1977.
- Medeiros, J.F.; Gheyi, H.R. Manejo do Sistema Solo-água-planta em solos afetados por sais. In: Manejo e Controle da Salinidade na Agricultura Irrigada. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 26, 1997, Campina Grande. Anais... Campina Grande: SBEA, 1997. 383p.
- Montenegro, S.M.G.L.; Montenegro, A.A.; Mackay, R. Análise estocástica de fluxo e transporte em solos não-saturados para avaliação de salinização. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v.7, n.2, p.17-34, 2002.
- Reynolds, W.D.; Elrick, A.; Clothier, B.E. The constant head well permeameter: effect of unsaturated flow. Soil Science. Baltimore, v.139, n.2, p.172-180, 1985.
- Rhoades, J.D. Drainage for salinity control. In: van Schilf-gaardde J. (ed.) Drainage for agriculture. Madison: American Society of Agronomy, 1974. p.433-462.
- Ribeiro, M.R.; Freire, F.J.; Montenegro, A.A.A. Solos holomórficos no Brasil: Ocorrência, Gênese, Classificação, Uso e Manejo Sustentável. In: Curi, N.; Marques, J.J.; Guilherme, L.R.G.; de Lima, J.M.; Lopes, A.S.; Alvarez V., V.H. (eds.). Tópicos em Ciência do Solo. v.3. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. cap.4, p.165-208.
- Ribeiro, M. R.; Corrêa, M. M. Levantamento detalhado de solos da Fazenda Nossa Senhora do Rosário. In: Montenegro, A. A. A. Diagnóstico e controle da salinização em aluviões com pequena agricultura irrigada. Recife: UFRPE, 2001. Relatório de Projeto CNPq- Programa Nordeste, processo número 521224/98-5.
- Salama, R. B., Farrington, P., Bartle, G. A., Watson, G. D. Distribution of recharge and discharge areas in a first-order catchment as interpreted from water level patterns. Journal of Hydrology, 143: 259-277, 1993.
- Santiago, F.S; Montenegro, A.A.; Montenegro, S.M G L. Avaliação de Parâmetros Hidráulicos e Manejo da Irrigação por Microaspersão em Área de Assentamento. Engenharia Agrícola, Piracicaba, v.24, n.3, p.632-643, 2004.
- Silva, E.F.; Assis Jr., R.N.; Sousa, J.I.G. Efeito da qualidade da água de irrigação sobre atributos hídricos de um Neossolo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.29, n.3, p.389-396, 2005.
- Souza, E.R.; Montenegro, A.A.; Freire, M.B. Evolução e variabilidade espacial da salinidade em Neossolo Flúvico cultivado com cenoura (*Daucus carota* L.) sob irrigação, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.12, n.6, p.1-10, 2008
- Vanclooster, M.; Viane, P.; Diels, J.; Christiaens, K. WAVE- a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment. Reference and user's manual (release 2.0), Leuven, 1994.
- van Genuchten, M. Th. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Res. Rep. 121. USDA- ARS, U.S. Salinity Laboratory, Riverside, C.A., 1987.

Evaluation of a Supplementary Irrigation Alternative With Moderately Saline Water in an Alluvial Valley in the Semi-Arid: Experimentation and Modeling

ABSTRACT

*The analysis of management alternatives is of fundamental importance for the sustainable development of irrigated agriculture in the semi-arid. The present study was developed in an alluvial valley under salinization risk, especially due to the practice of irrigated agriculture, associated to the quality of the available groundwater. The study was developed in a plot cropped with carrots (*Daucus carota* L.) using trickle irrigation in the beginning of the rainy season. The performance of the irrigation management using moderately saline water ($EC = 1.38 \text{ dS m}^{-1}$) was evaluated based on partial leaching of salts, and maintenance of adequate moisture and salt contents in the soil profile. A decrease in the electrical conductivity of soil water was observed in the 0–100 cm depth after irrigation application, especially in the root zone. Numerical simulations of water flow and salt transport in the unsaturated zone were performed. The simulation results reproduced well the field measured pressure heads and salt concentrations. It was verified, through field experiment and modeling, that the incomplete leaching alternative is adequate when compared to complete leaching, considering both salinity of the irrigation water and the crop tolerance to salinity. Incomplete leaching may provide suitable conditions for plant development, at the same time as it saves water used for irrigation.*

Keywords: *incomplete leaching, numerical modeling, salinity, carrot.*