

## 8 MANEJO DO SISTEMA SOLO-ÁGUA-PLANTA EM SOLOS AFETADOS POR SAIS

José Francismar de Medeiros e Hans Raj Gheyi

### 8.1 INTRODUÇÃO

Rendimentos elevados de plantas cultivadas em solos e com águas de irrigação afetados por sais podem ser obtidos, se práticas de manejo apropriadas forem utilizadas e as condições ambientais forem favoráveis. No mundo, numerosos exemplos de empreendimentos agrícolas com sucessos sob condições salinas podem ser citados (Hoffman *et al.*, 1992). Nos Estados Unidos, alfafa, sorgo e trigo são irrigados nos vales de Arkansas e Colorado com água contendo de 1500 a 5000 mg  $\ell^{-1}$  de sólidos dissolvidos totais (SDT). No vale do Pecos, no Texas, água de 2500 mg  $\ell^{-1}$  tem sido usada a décadas. Trigo tem sido irrigado na Índia usando água contendo acima de 10000 mg  $\ell^{-1}$  de SDT em áreas que recebem chuvas monçônicas. Bons rendimentos de algodão tem sido obtidos em “Uzbekistan” irrigando-se com água de drenagem contendo de 5000 a 6000 mg  $\ell^{-1}$  de SDT. Em clima monçônico continental semi-árido da China, água salina (2000 a 5000 mg  $\ell^{-1}$ ) tem sido utilizada para irrigação de trigo, milho e algodão desde a década de 70, com excelentes resultados.

A produção das culturas onde a salinidade está presente, pode somente ser completamente avaliada no contexto das características estabelecidas para as condições específicas de campo. Uma vez sendo conhecidas as condições ambientais, as práticas de rotação de cultura e manejo, as culturas podem ser selecionadas baseadas em sua tolerância à salinidade, fatores econômicos, sistema de irrigação, drenabilidade do solo e práticas culturais preferidas. Irrigação e práticas de manejo das culturas sob condições salinas são freqüentemente diferentes das condições não salinas. A informação básica requerida para as decisões de manejo onde a salinidade está presente, inclui como as culturas respondem à salinidade e aos íons tóxicos e o efeito dos sais na infiltração da água no solo. Também, dependendo da situação, informações sobre os efeitos de determinados fatores ambientais como temperatura, umidade e poluição do ar, a respeito do risco do umedecimento do dossel das plantas pela aspersão, das mudanças na tolerância à salinidade nos vários estágios de crescimento da cultura e da corrosão de equipamentos devem ser consideradas.

Em seguida será discutido os fatores que afetam a salinidade do solo e a resposta das culturas à salinidade, como também, as práticas de manejo que devem ser adotadas em áreas afetadas por sais.

### 8.2 BALANÇO DE SAIS NA ZONA RADICULAR

De acordo com Rhoades & Loveday (1990), van Hoorn & van Alphen (1994), entre outros, a remoção de sais da zona radicular para manter a solução do solo a um nível de salinidade compatível com o sistema de cultivo depende da manutenção do balanço de sais.

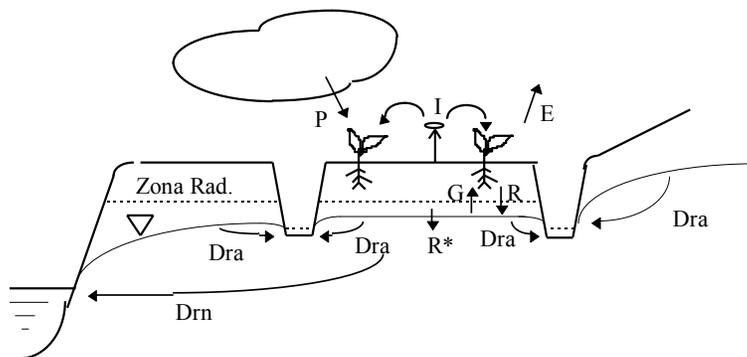


Figura 8.1 Balanço de água na zona radicular de uma cultura numa área irrigada.

Essa lixiviação dos sais é o fator mais importante para evitar a salinização de uma área irrigada. Além disso, segundo Scalopi & Brito (1986), vários outros fatores podem ainda afetar o processo de salinização, como a drenabilidade do solo, a precipitação dos sais de baixa solubilidade, manejo da irrigação e manejo agrônômico.

Segundo Hoffman (1981), a quantidade de água que deve ser lixiviada abaixo da zona radicular, depende da concentração de sais na água de irrigação; do solo e da água subterrânea; da tolerância das culturas a serem exploradas; condições climáticas; e do manejo do solo e água.

Richards (1954), Rhoades & Loveday (1990), Hoffman *et al.* (1992) e van Hoorn & van Alphen (1994), de forma simples, descrevem que a relação entre a lâmina percolada abaixo da zona radicular e a água total aplicada é igual a relação entre a concentração de sais da água aplicada e a água drenada abaixo da zona radicular, correspondendo a fração de lixiviação (FL). Em seguida, demonstraremos essa relação.

Considerando-se a zona radicular como um só estrato com uma distribuição homogênea de água e sais, e um período mais ou menos longo como o de um ano, de maneira que o teor de água seja o mesmo no início e no final do período considerado, o balanço de água numa área irrigada é ilustrado através da Figura 8.1 e dado pelas Equações 8.1 e 8.2.

$$I + P + G = E + R \quad (8.1)$$

$$R^* = R - G \quad (8.2)$$

onde,  $I$  é a água efetiva de irrigação,  $P$  é a precipitação pluviométrica efetiva,  $E$  é a evapotranspiração,  $G$  é a ascensão capilar,  $R$  é a percolação profunda e  $R^*$  é a percolação profunda líquida.  $Dra$  é a drenagem artificial e  $Drn$  é a drenagem natural.

Segundo Rhoades (1974), uma relação de balanço de sais pode ser obtida pela soma algébrica de várias entradas e saídas de sais para a salinidade da água (solução) do solo ( $S_{as}$ ) da zona radicular.

$$V_a C_a + V_g C_g + S_m + S_f - V_r C_r - S_p - S_c = \Delta S_{as} \quad (8.3)$$

onde  $V_a$ ,  $V_g$  e  $V_r$ , e  $C_a$ ,  $C_g$  e  $C_r$  são volumes e concentrações totais de sais da água de irrigação, solo e água de drenagem, respectivamente. O  $V_g$  refere-se àquela água que se move dentro da zona radicular vinda do lençol freático.  $S_m$  é a quantidade de sais deixada na solução pela intemperização dos minerais do solo ou dissolução dos sais precipitados;  $S_f$  é a quantidade de sais solúveis adicionados por produtos agroquímicos (fertilizantes e corretivos) e esterco animal;  $S_p$  é a quantidade de sais solúveis aplicados (da água de irrigação) que se precipita no solo depois da aplicação; e  $S_c$  é a quantidade de sais removida da água do solo na porção colhida da cultura. A diferença líquida entre essas entradas e saídas é igual a mudança resultante na salinidade da água do solo ( $\Delta S_{as}$ ). Sob condições de equilíbrio ( $\Delta S_{as}=0$ ), assumindo: (i) contribuição não apreciável de sais pela dissolução de minerais do solo ou sais precipitados, ou perdas de sais solúveis por processos de precipitação e remoção da cultura (ou alternativamente que o efeito líquido dessas reações opostas sejam aproximadamente compensáveis);(ii) aplicação uniforme da água no campo; e (iii) a profundidade do lençol freático seja suficiente para evitar a introdução de sais na zona radicular por processos de ascensão capilar, a Equação 8.3 se reduz a seguinte relação:

$$\frac{R}{I} = \frac{CE_a}{CE_r} = FL \quad (8.4)$$

onde o I e R (respectivamente, lâmina de irrigação e de drenagem) substitui os correspondentes volumes, e a condutividade elétrica (CE) substitui a concentração de sais. Esta equação permite obter a fração de lixiviação (FL) para as condições dadas.

Conforme van Hoorn & van Alphen (1994), para condições de equilíbrio, se toda a água de irrigação se mistura plenamente com a água do solo, a concentração de sais da água à capacidade de campo será igual a concentração de sais que percola da zona radicular, podendo as lâminas de percolação ( $R^*$ ) e de irrigação (I) serem calculadas como função da FL:

$$I = (E - P) \cdot \frac{C_{cc}}{C_{cc} - C_a} = (E - P) \cdot \frac{1}{1 - FL} \quad (8.5)$$

$$R^* = (E - P) \cdot \frac{C_a}{C_{cc} - C_a} = (E - P) \cdot \frac{FL}{1 - FL} \quad (8.6)$$

onde,

E - evapotranspiração, em mm;

P - precipitação pluviométrica efetiva, em mm;

$C_a$  e  $C_{cc}$  - concentração de sais na água de irrigação e no solo à capacidade de campo, que pode ser expressa também em termos de condutividade elétrica (CE) à 25 °C.

O termo (E - P), representa a influência do clima sobre a quantidade de água de irrigação necessária;  $C_a$ , a influência da qualidade da água de irrigação; e  $C_{cc}$ , o critério

agronômico, que leva em conta a influência da salinidade sobre o rendimento da cultura, isto é, a tolerância da cultura a ser explorada.

Na realidade, a zona radicular é uma região na qual a água absorvida pela planta diminui com a profundidade. A quantidade de água percolada através do perfil do solo, assim, diminui com a profundidade, enquanto a salinidade aumenta. Como resultado, quando o sistema encontra-se em equilíbrio, a salinidade do solo cresce com a profundidade.

Entretanto, conforme Ayers & Westcot (1991), a salinidade que as plantas irão ficar expostas não será aquela da água de drenagem, visto que a absorção de água pela cultura varia com a profundidade e com conseqüentes frações de lixiviação diferentes ao longo da zona radicular, tem-se um perfil de salinidade crescente com a profundidade, sendo a salinidade na parte inferior da zona radicular igual a salinidade da água de drenagem. Como demonstração, será mostrado um exemplo, que considera uma zona radicular dividida em 4 camadas, com uma absorção de água da camada superior para a inferior de 40, 30, 20 e 10%, que é considerado o padrão de absorção normal (Ayers & Westcot, 1991). Neste caso, a quantidade de água aplicada à primeira camada e a quantidade de água percolada da quarta (última) camada pode ser calculada a partir do valor de FL utilizando as Equações 8.5 e 8.6.

A Tabela 8.1 mostra a seqüência dos cálculos para uma zona radicular dividida em 4 camadas. A percolação de cada camada é igual a água de irrigação que entra na camada menos a absorvida pelas raízes. A água de percolação da primeira camada serve como água de irrigação da segunda camada, e assim sucessivamente. Em seguida, a equação de equilíbrio dos sais (8.4) é aplicada para cada camada. Para a primeira camada,  $CE_a$  representa a salinidade da água de irrigação; para segunda camada, a salinidade da água de percolação da primeira camada, e assim por diante, de modo que:

$$(CE_a)_n = (CE_{cc})_{n-1} = (2CE_{es})_{n-1} \quad (8.7)$$

onde o sub-índice “es” denota no extrato de saturação e “n” representa ordem de camadas.

Os valores de  $CE_r$ ,  $\overline{CE}_{cc}$  e  $\overline{CE}_{es}$  da i-ésima camada, onde a barra denota o valor médio, são calculados pelas Equações 8.8, 8.9 e 8.10, respectivamente:

$$(CE_r)_i = \frac{I_i}{R_i} (CE_a)_i \quad (8.8)$$

$$(\overline{CE}_{cc})_i = \frac{(CE_a)_i + (CE_r)_i}{2} \quad (8.9)$$

$$(\overline{CE}_{es})_i = \frac{U_{cc} (\overline{CE}_{cc})_i}{US} \quad (8.10)$$

A Figura 8.2 mostra um exemplo de perfis de salinidade calculado, esperado depois de um longo período de uso de água de irrigação, para 5 frações de lixiviação e  $CE_a = 1,0$  dS/m, para o padrão de extração normal, calculado conforme procedimento apresentado na Tabela 8.1.

De acordo com esse método de cálculo, a fração de lixiviação para obter a mesma média de salinidade na zona radicular é menor que aquela que se calcula para uma zona radicular de salinidade homogênea, como mostra a Figura 8.3.

Em experimento conduzido em lisímetro por Bower *et al.* (1969), utilizando diferentes salinidades da água de irrigação e frações de lixiviação, mostraram como estes fatores afetam a distribuição e acumulação de sais solúveis no perfil do solo irrigado em condições de equilíbrio (Figuras 8.4 e 8.5). Segundo Rhoades & Loveday (1990), dados semelhantes a esses e experiências de campo com manejo convencional da irrigação mostram que para terrenos irrigados, sob condições de equilíbrio, têm-se o seguinte:

Tabela 8.1. Cálculos da salinidade do solo considerando o perfil da zona radicular dividido em 4 camadas.<sup>1</sup>

Camada (i)	I	Absorção Água Irr.	R*	CE <sub>a</sub>	CE <sub>r</sub> =CE <sub>cc</sub>	$\overline{CE}_{cc}$	$\overline{CE}_{es}$ <sup>2</sup>
1	1,1765(E-P)	0,4(E-P)	0,7765(E-P)	1,000	1,515	1,258	0,629
2	0,7765(E-P)	0,3(E-P)	0,4765(E-P)	1,515	2,469	1,992	0,996
3	0,4765(E-P)	0,2(E-P)	0,2765(E-P)	2,469	4,255	3,362	1,681
4	0,2765(E-P)	0,1(E-P)	0,1765(E-P)	4,255	6,666	5,460	2,730
<b>Média do Perfil</b>							<b>1,509</b>
<b>Média do Perfil Ponderada com a Absorção (<math>\overline{CE}_{es}</math>)</b>							<b>1,160</b>

<sup>1</sup> Supondo: CE<sub>a</sub> = 1,0 dS.m<sup>-1</sup>; FL = 0,15, logo, I = 1,1765(E - P) e R = 0,1765(E - P); e padrão de absorção normal.

<sup>2</sup> Adotou-se que a umidade de saturação (US) é o dobro da umidade à capacidade de campo (U<sub>cc</sub>), o que normalmente ocorre para solos de textura média. Assim, CE<sub>es</sub>=0,5CE<sub>cc</sub>.

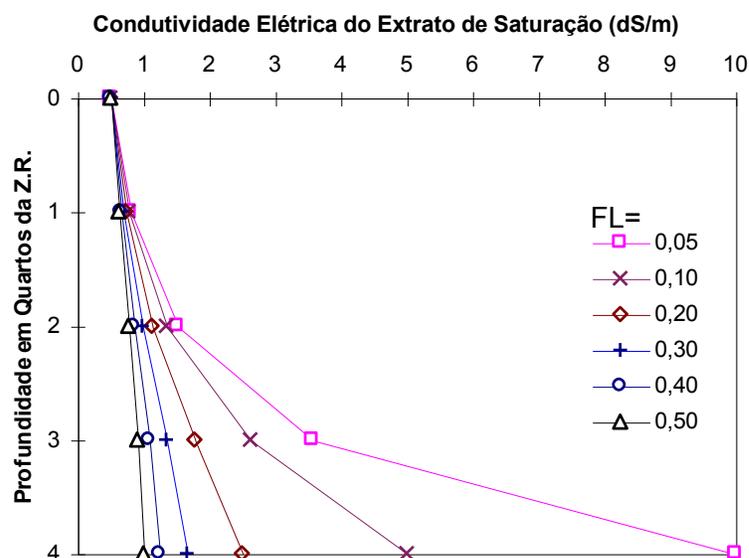


Figura 8.2 Perfis de salinidade esperada, resultante de irrigação a longo prazo com água de CE=1,0 dS.m<sup>-1</sup> e várias FL.

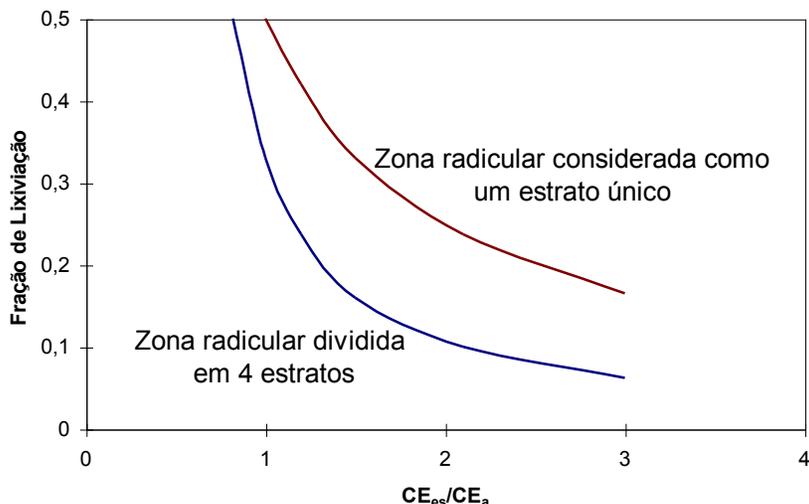


Figura 8.3 Relação entre  $CE_{es}/CE_a$  e FL para a zona radicular, assumindo-a como um ou quatro estratos (van Hoorn & van Alphen, 1994).

- i) o teor de sais da solução do solo aumenta no perfil com a profundidade da zona radicular, exceto quando se irriga com águas de baixa salinidade ( $CE < 0,2 \text{ dS.m}^{-1}$ ) e frações de lixiviação altas ( $FL > 0,5$ );
- ii) a salinidade da solução do solo aproxima-se a da água de irrigação próximo à superfície do solo independente da fração de lixiviação, mas aumenta com a profundidade quando FL é diminuída;
- iii) para uma relação  $CE_a/FL$  aproximadamente igual, a salinidade da solução do solo é proporcional a  $CE_a$  próximo da superfície do solo, mas é aproximadamente independente da  $CE_a$  no fundo da zona radicular;
- iv) a salinidade média da solução do solo na zona radicular aumenta e o rendimento da cultura decresce, à medida em que aumenta a  $CE_a$  e há decréscimo da FL;
- v) os primeiros incrementos da lixiviação são os mais efetivos para se prevenir a acumulação de sais na zona radicular (Figura 8.5).

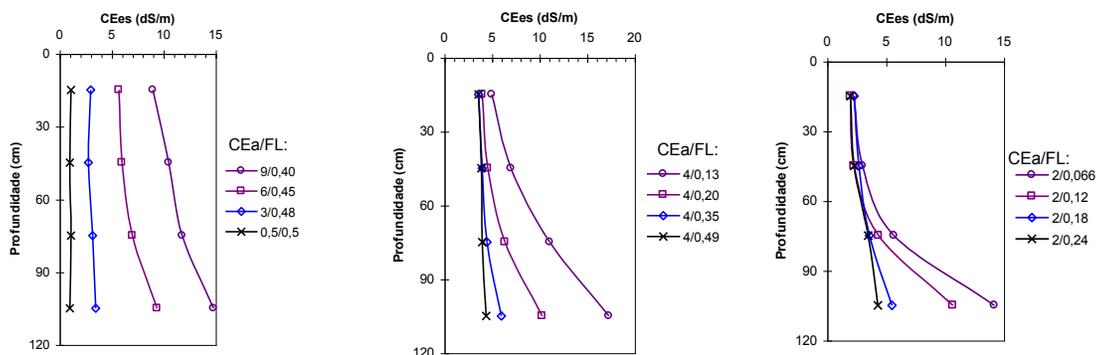


Figura 8.4 Perfis de salinidade, em condições de equilíbrio, resultantes de diferentes águas de irrigação aplicadas com diversas FL (adaptado de Bower *et al.*, 1969).

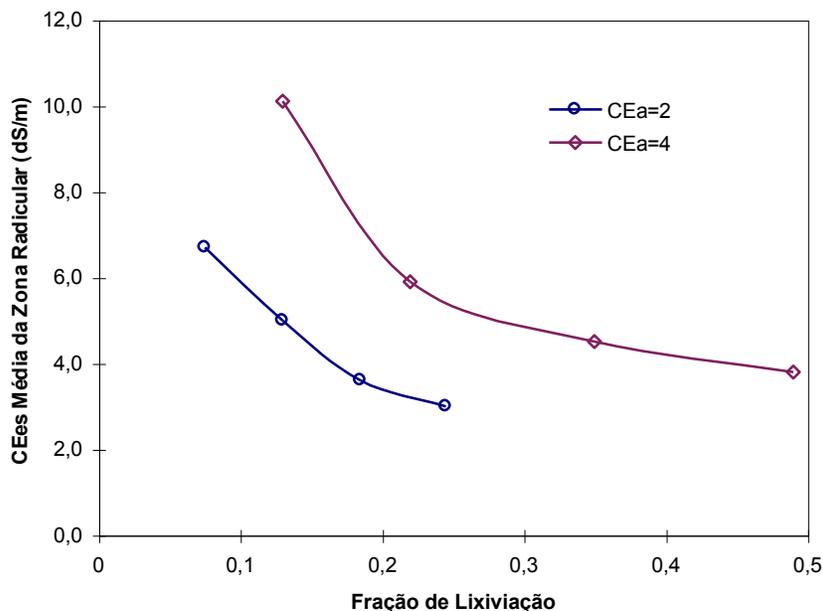


Figura 8.5 Relação entre a salinidade média da zona radicular e FL, para duas concentrações de água de irrigação (Bower *et al.*, 1969).

Por outro lado, quando se considera períodos curtos de irrigação, é comum haver variações na salinidade do solo. Isso acontece devido variações sazonais no clima, culturas e quantidades e qualidade de água (van Hoorn & van Alphen, 1994). Sendo conhecido o teor de sais no início, na zona radicular, pode-se calcular a variação de armazenamento de sais ( $\Delta Z$ ) no intervalo de tempo considerado, como:

$$\Delta Z = \frac{I \cdot C_a - \frac{R^* \cdot Z_1}{W_{cc}}}{1 + \frac{R^*}{2 \cdot W_{cc}}} \quad (8.11)$$

onde,

$Z_1$  - quantidade de sais na zona radicular ( $Z = CE_{cc} \cdot W_{cc}$ ), no início da irrigação ou período considerado, expresso como  $CE_{mm}$ , em  $dS \cdot m^{-1} \cdot mm$ .

$W_{cc}$  - lâmina de água que o solo retém à capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) na profundidade da zona radicular, em mm.

A variação de CE da água do solo à capacidade de campo, pode ser obtida pela relação entre a variação de armazenamento de sais ( $\Delta Z$ ) e  $W_{cc}$ .

Caso a água de irrigação seja rica em sais de baixa solubilidade (carbonato de cálcio e magnésio e sulfato de cálcio), para se aplicar as equações de balanço de sais no solo, de forma simplificada, são utilizadas para a concentração dos sais altamente solúveis e posteriormente corrige-se para os sais de baixa solubilidade. Os sais de baixa solubilidade

considerados são o  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , os quais podem contribuir para a salinidade do solo até em 0,8 e 2,5  $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ , respectivamente (van Hoorn & van Alphen, 1994). Assim, quando uma água de irrigação rica em carbonatos e sulfato de cálcio é concentrada na solução do solo, a salinidade resultante pode ser estimada pela seguinte aproximação:  $\text{CE}_{\text{es}} = 3,3 + 0,5 \cdot \text{CE}_{\text{cc(SAIS SOLÚVEIS)}}$ . A  $\text{CE}_{\text{cc}}$  é obtida de forma convencional, ou seja, a CE correspondente aos sais mais solúveis da água de irrigação vezes o fator de concentração da solução do solo (1/FL).

Uma modificação na concentração de sais na água de percolação ( $C_r$ ) proveniente da modificação no teor de umidade retida no solo ( $C_{\text{as}}$ ), permite que se introduza um coeficiente de eficiência de lixiviação.

Segundo van Hoorn & van Alphen (1994), o grau com que a água infiltrada se mistura com a solução do solo, pode ser expressa pelo coeficiente de eficiência de lixiviação, que pode ser definida de duas maneiras: (i) com respeito a água de percolação na parte inferior da zona radicular - coeficiente de eficiência de lixiviação “fr” - definido como a fração de água percolante da solução do solo, e foi originalmente introduzida para recuperação de solos salinos; e (ii) com respeito à água de irrigação - coeficiente de eficiência de lixiviação “fi” - definido como a fração da água de irrigação misturada com a solução do solo. Enquanto “fr” depende de “fi” e I, P e E, fi apenas depende da textura e estrutura do solo e método de irrigação. Em estudos realizados na Tunísia, os valores de “fi” variaram entre 0,6 e 0,95, sendo os menores valores para solos argilosos e irrigação por inundação.

Se apenas parte da água infiltrada é eficiente para lixiviar, a fração de lixiviação não é igual a relação entre a lâmina de água percolada e de irrigação,  $R^*/I$ , mas igual a relação entre a lâmina de água percolante da solução do solo,  $(fi \cdot I - E + P)$ , e a lâmina da água de irrigação que se mistura com a solução do solo,  $fi \cdot I$ . Então, as equações de balanço de sais (8.4), (8.5) e 8.6) passam a apresentar a seguinte configuração:

$$FL_b = \frac{fi \cdot I - (E - P)}{fi \cdot I} = \frac{C_a}{C_{cc}} \quad (8.12)$$

$$I = (E - P) \frac{1}{fi \cdot (1 - FL_b)} \quad (8.13)$$

$$R^* = I[1 - fi \cdot (1 - FL_b)] \quad (8.14)$$

onde,  $FL_b$  é a fração de lixiviação efetiva.

Para se estimar a fração de lixiviação requerida para satisfazer a  $FL_b$ , utiliza-se a seguinte expressão:

$$FL = 1 - fi \cdot (1 - FL_b) \quad (8.15)$$

Conforme van Hoorn & van Alphen (1994), aplicando-se o conceito de eficiência de lixiviação no balanço de sais para o perfil de quatro camadas, para valores de “fi” em torno de 0,8, a salinidade média do perfil equipara-se a salinidade estimada para a zona radicular considerada como uma só camada e  $fi=1,0$ .

### 8.3 FATORES QUE AFETAM A SALINIDADE DO SOLO E RESPOSTA DAS CULTURAS À SALINIDADE

Conforme Rhoades *et al.* (1992), como foi mostrado pelo estudo de modelagem conceitual de Rhoades & Merrill (1976), a salinidade dos solos e resposta das plantas à salinidade são afetadas pelas características de retenção de água do solo, frequência de irrigação, fração de lixiviação e salinidade da água de irrigação. Baseado nesse estudo para as condições de equilíbrio, Rhoades *et al.* (1992) retirou as seguintes conclusões:

i) A salinidade da água de irrigação e a FL são combinadas para se estabelecer o nível de distribuição de estresse osmótico na zona radicular e o valor do potencial osmótico médio; também afetando o potencial total médio;

ii) a fração de lixiviação tem pouco efeito no potencial mátrico médio, mas a frequência de irrigação afeta significativamente, devido a depleção de água entre irrigações e características de retenção de água do solo;

iii) a duração do estresse, tais como “dias de estresse”, é afetado pela salinidade da água de irrigação, fração de lixiviação, frequência de irrigação e características de retenção de água do solo;

iv) embora a importância desses índices de “status” de água na resposta das culturas possa variar com a tolerância das plantas, a composição da água, propriedades do solo e condições de estresse climático, parece interessante concluir que: onde águas salinas são usadas para irrigação, a FL deveria ser aumentada para elevar o potencial osmótico e, todos outros fatores sendo mantidos constantes, a frequência de irrigação deveria ser aumentada para elevar o potencial mátrico, que combinados maximizam o potencial total e minimizam a duração dos “dias de estresse”;

v) a salinidade média no espaço (profundidade) deveria ser um índice razoavelmente bom de resposta das plantas à salinidade da água do solo nos casos onde o estresse mátrico é significativo, como nas condições de irrigação pouco frequente, devido a dependência acentuada da duração de “dias de estresse” à fração de lixiviação. Isso é assim porque a FL primeiramente afeta o nível de salinidade no fundo da zona radicular; entretanto, um parâmetro de salinidade que está relacionado à distribuição da salinidade, especialmente da salinidade da parte inferior da zona radicular, deveria ser usada como um índice aproximado para estimar a resposta das culturas para o caso de irrigação pouco frequente.

vi) quando o intervalo entre as irrigações é prolongado a duração de estresse aumenta e menos condições é dada para o desenvolvimento da cultura “vir equiparar-se” a irrigações frequentes. A diminuição do potencial osmótico associada a frações de lixiviação pequenas e ao uso de águas de irrigação salinas, torna-se especialmente perigoso, porque o nível de “estresse crítico” do potencial total será alcançado mais rapidamente (para uma dada quantidade de uso de água), quanto maior for o potencial osmótico no começo da depleção de água;

vii) sob condições de irrigações mais frequentes, a resposta das plantas à salinidade deveria torna-se relativamente mais relacionado a  $CE_a$  e potencial osmótico médio, do que a FL e salinidade média com a profundidade. Alguns resultados experimentais confirmam isso (Meiri, 1984; Bresler & Hoffman, 1986; Bresler, 1987).

Em seguida serão discutidos os diferentes fatores que afetam a salinidade do solo e resposta das plantas à salinidade.

### **8.3.1 Salinidade integrada no tempo e espaço**

No campo, a distribuição dos sais nem é uniforme no espaço, nem é constante com o tempo. A aplicação de resultados experimentais dos estudos de tolerância à salinidade das culturas para as condições de campo, requer conhecimentos de resposta das plantas à salinidade variando com o tempo e profundidade. Até o momento, muitos experimentos de campo tem sido conduzido considerando a hipótese de que as plantas respondem à salinidade média da zona radicular durante a estação de crescimento.

Rhoades (1972) introduziu o conceito de salinidade média integrada da solução do solo, ao longo do ciclo de irrigação, para considerar as variações de salinidade entre irrigações. Segundo Rhoades & Merrill (1976), a salinidade média da água do solo, em determinado intervalo de tempo, é maior em solos que são irrigados com menor frequência, quando se mantém outros fatores constantes.

Ingvalson *et al.* (1976) correlacionaram o rendimento de alfafa, obtido sob condições de salinidade na zona radicular não uniforme para vários índices de salinidade, e verificaram que o rendimento foi melhor correlacionado à salinidade da água de drenagem do que da água de irrigação, como também, correlacionou-se melhor à salinidade média integrada no tempo e no espaço, do que com a salinidade média da zona radicular e ponderada com a absorção de água, embora estes índices tenham mostrado correlações relativamente altas. Vale salientar que o método de irrigação adotado era inundação intermitente e a frequência das aplicações de água correspondia a de irrigações convencionais.

**Integração com a profundidade:** Em experimento de campo para estabelecer a tolerância à salinidade do milho, Hoffman *et al.* (1983) utilizando dois métodos de irrigação (microaspersão e subirrigação), obtiveram perfis de salinidade do solo diferentes para cada método de irrigação (Figura 8.6), entretanto, as curvas de resposta de tolerância à salinidade para os métodos de irrigação, usando a salinidade média linear do perfil para todos os níveis de salinidade testados durante os três anos de experimento não diferiram estatisticamente (Figura 8.7). Isso sugere que as plantas respondem a média aritmética dos valores de salinidade da zona radicular. Os resultados dos estudos de milho em solos orgânicos concordam com resultados de experimento de campo em Israel com solo mineral cultivando amendoim e tomate, e com resultados da Califórnia para alfafa (Hoffman *et al.*, 1992).

**Integração no tempo:** Para avaliação, a salinidade do solo é tipicamente monitorada no começo e fim do ciclo da cultura e os valores são usados para determinar a salinidade média do solo. Em experimentos, a salinidade do solo é normalmente monitorada com maior frequência. Relacionar a resposta das culturas à salinidade do solo integrada no tempo é difícil porque, para algumas culturas, a sensibilidade varia com o estágio de desenvolvimento.

Bernstein & Pearson (1954), comparando a influência de um nível constante de salinidade com níveis crescendo e diminuindo, em vários ciclos, porém mantendo o valor médio do potencial osmótico idêntico ao produzido pelo nível constante, concluíram que o pimentão respondeu a salinidade média do período, independente se variava ou não durante o desenvolvimento da cultura, enquanto o tomate foi mais afetado por períodos de alta

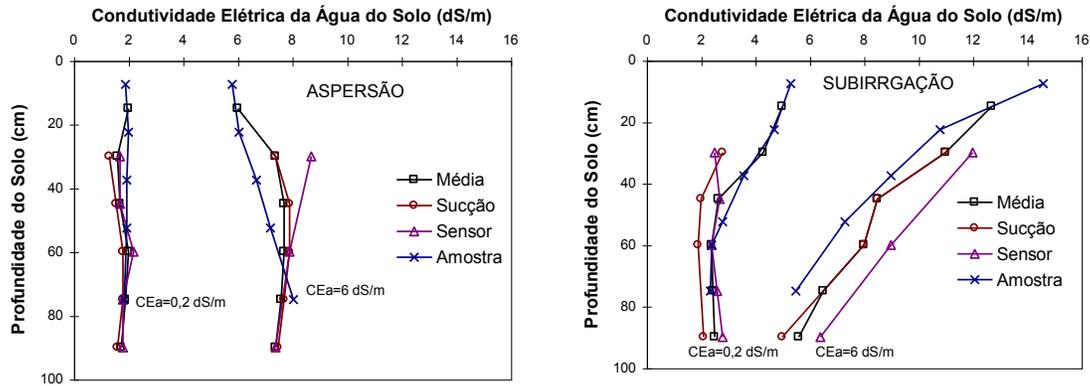


Figura 8.6. Perfis de CE da água do solo, em termos de média ponderada com o tempo, medida por diferentes métodos e a média composta destas medidas, quando irrigado com águas de 0,2 e 6,0 dS/m e dois métodos de irrigação (adaptado de Hoffman *et al.*, 1983).

salinidade. Meiri & Polijakoff-Mayber (1970) observaram que a área foliar relativa do feijão dos diferentes experimentos de salinidade foi afetada linearmente com a salinidade. Então, a resposta à salinidade média do período é provavelmente uma estimativa razoável, a não ser que valores de salinidade durante o ciclo inclua valores que sejam menores e maiores do que a salinidade limiar da cultura ou, como foi provavelmente o caso para tomate, existiam alguns valores de salinidade que excediam a faixa de resposta linear na curva de tolerância à salinidade.

Avaliar a resposta de culturas perenes à salinidade no tempo é mais complexo do que para as anuais, porque o rendimento pode ser afetado pela salinidade do solo de anos anteriores. É difícil explicar como ocorre a compensação do efeito da salinidade devido períodos de dormência e mudanças drásticas do tempo como as monções, chuvas de inverno ou grandes mudanças da demanda evaporativa da atmosfera. Segundo Hoffman *et al.* (1992), o período de tempo apropriado para determinar a salinidade média dependerá da cultura e de seu ambiente.

### 8.3.2 Freqüência de irrigação

A freqüência das irrigações é uma das práticas potencial de manejo de água disponível para enfrentar solos e águas salinos. Poucas evidências experimentais existentes, entretanto, sustentam como recomendação comum, que o intervalo de irrigação deveria ser diminuído quando se utiliza água de irrigação salina (Rhoades *et al.*, 1992).

Quando o solo seca devido a evapotranspiração, depois de uma irrigação, os potenciais mátrico e osmótico diminuem. A taxa de decréscimo depende da taxa de evapotranspiração e da relação entre o potencial mátrico e o teor umidade do solo. A taxa de secamento do solo decresce quando o potencial osmótico diminui, produzindo, assim, um maior valor do potencial mátrico antes da próxima irrigação. Contrapondo a esse processo, o intervalo de irrigação influencia na forma da distribuição de sais no perfil e no nível total de salinidade do solo. Como mostrado por van Schilfhaarde *et al.* (1974) através dos cálculos de um modelo, e experimentalmente por Bernstein & Francois (1973), aumentando a freqüência de irrigação, sob condições de equilíbrio, resulta em uma

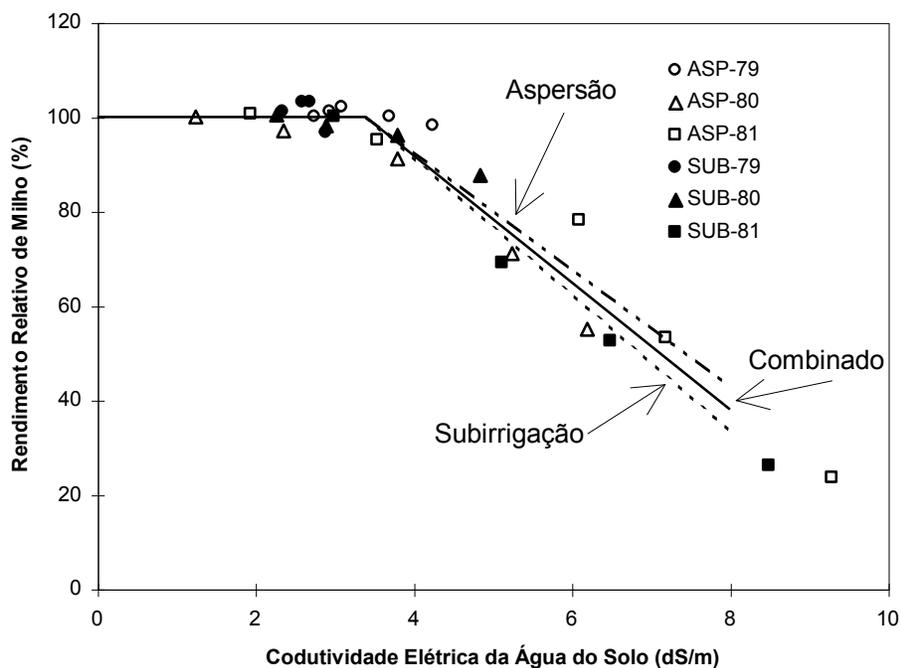


Figura 8.7 Rendimento relativo de milho como função da salinidade do solo produzido pelos métodos de irrigação por aspersão e subirrigação (adaptado de Hoffman *et al.*, 1983).

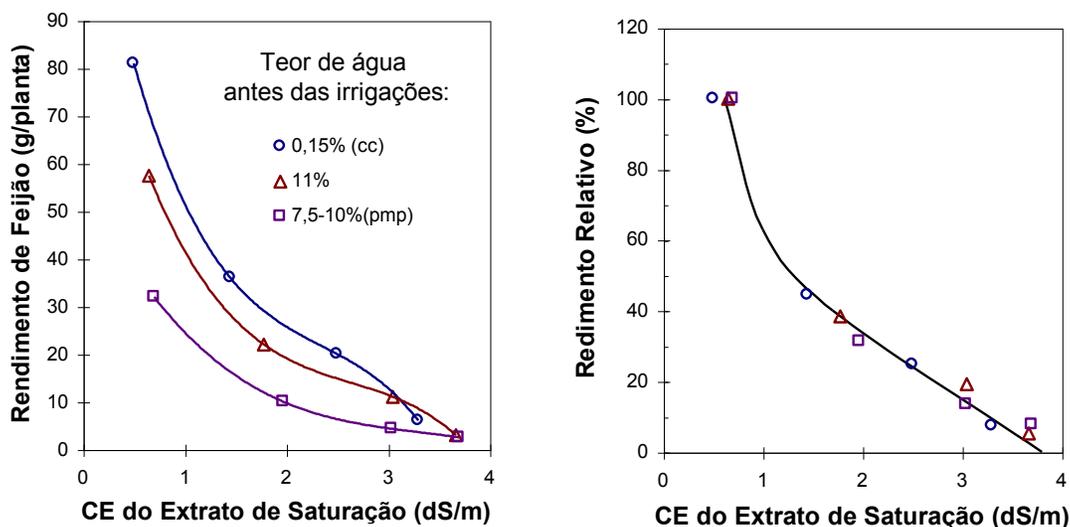


Figura 8.8 Rendimento o absoluto e relativo de feijão como função da salinidade do solo e três intervalos de irrigação (adaptado de Ayers *et al.*, 1943).

mudança para cima do pico de salinidade no perfil de distribuição de sais, fazendo com que aumente a concentração média de sais na porção superior da zona radicular. Além disso, irrigando mais freqüentemente, cresce a evaporação do solo, levando a aplicações adicionais de água e um acréscimo na quantidade de sais aplicados. Conseqüentemente, encurtando o intervalo entre as irrigações para superar o efeito da concentração de sais por ocasião do secamento do solo, pode resultar em um aumento global na salinidade do solo. O efeito líquido desse processo contraditório no rendimento da cultura é difícil de se prever.

Ayers *et al.* (1943) e Wadleigh & Ayers (1945) determinaram o efeito do teor de água do solo, exatamente antes da irrigação, na resposta do feijão à salinidade. O intervalo de irrigação foi baseado no potencial mátrico do solo antes da próxima irrigação, portanto, quanto maior foi a salinidade do solo, maior o foi o intervalo de irrigação subsequente. Os autores concluíram que o efeito da salinidade nas reduções de rendimento foi maior naqueles tratamentos onde o potencial mátrico do solo foi menor (mais seco) no momento da irrigação. Entretanto, se os dados de rendimentos de Ayers *et al.* (1943) são colocados em termos relativos (Figura 8.8), o efeito relativo da salinidade crescente na redução de rendimento é independente do intervalo de irrigação. Segundo Hoffman *et al.* (1992), um resultado similar é obtido quando também se converte os dados de Wadleigh & Ayers (1945). A freqüência de irrigação não teve influência no desenvolvimento do feijão no campo (Bernstein & Francois, 1975) ou em citros (Heller *et al.*, 1973).

Em experimentos de campo recentes com berinjela (Shalhevet *et al.*, 1983) e milho (Shalhevet *et al.*, 1986), foram testados vários intervalos de irrigação e salinidade da água. Os cultivos foram conduzidos em três diferentes tipos de solos em duas regiões ecológicas de Israel. Uma função unificada de rendimento relativo como função da salinidade média da zona radicular poderia ser usada para ambas culturas para todos os intervalos de irrigação. Os resultados para os experimentos de milho são apresentados na Figura 8.9.

Um efeito benéfico do intervalo de irrigação mais curto na resposta de guaiule à salinidade foi reportado por Wadleigh *et al.* (1946). Efeitos prejudiciais da alta frequência de irrigação, entretanto, tem sido relatado por bastantes pesquisadores. Bernstein & Francois (1975) atribuíram a redução de rendimento a lavagem de sais acumulados próximo a superfície do solo para a zona radicular, causando “choque osmótico”, e a danos foliares que

ocorreram com irrigações por aspersão mais frequentes. Wagenet *et al.* (1980), cultivando cevada em pequenas parcelas numa casa de vegetação, irrigando a cada 2 ou 4 dias, concluíram que a tolerância da cultura à salinidade foi maior para a menor frequência de irrigação.

Hoffman *et al.* (1992) concluíram que a maior parte das resultados experimentais evidenciam que não é válida a suposição de que o intervalo de irrigação deveria ser diminuído sob condições salinas. A maioria dos estudos mostram efeito não interativo entre salinidade e intervalo de irrigação. Sob algumas circunstâncias, irrigações mais frequentes podem ser prejudiciais.

De acordo com Rhoades & Loveday (1990) e Ayers & Westcot (1991), para irrigação convencional, a cultura responde a salinidade média do perfil da zona radicular, enquanto para irrigações de alta frequência, os primeiros autores recomendam a média ponderada com a absorção de água em cada camada da zona radicular. Essa última recomendação é também sustentada por Hoffman (1981), o qual define que a salinidade média na zona radicular que a cultura fica exposta é dada pela Equação 8.17 apresentada por Bernstein & Francois (1973).

### 8.3.3 Necessidade de lixiviação

A lixiviação é a chave da irrigação bem sucedida onde a salinidade é excessiva. É o único meio pelo qual a salinidade do solo pode ser mantida em níveis aceitáveis sem riscos para as culturas. Quanto mais salina é a água de irrigação ou mais sensível é a cultura à

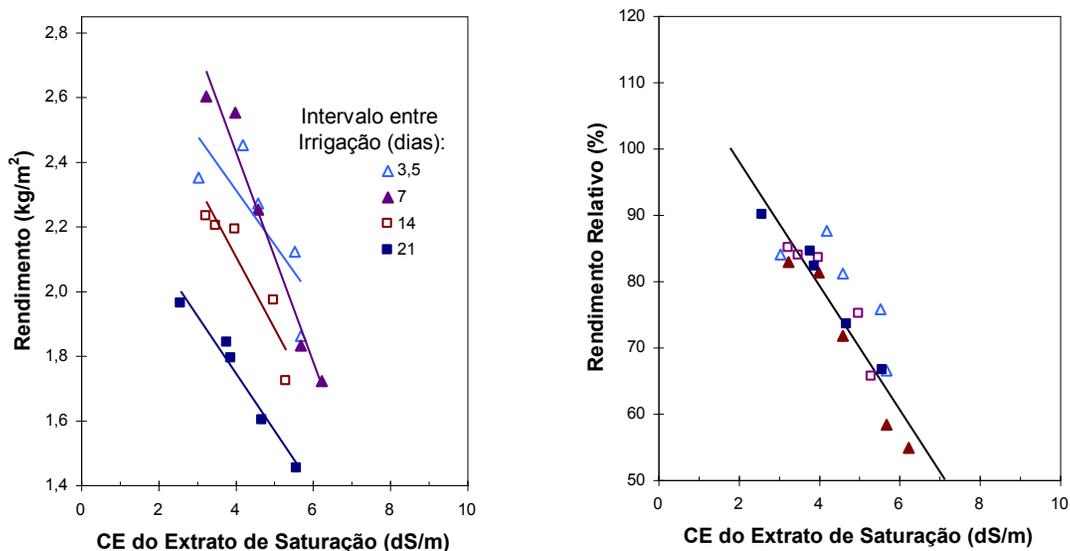


Figura 8.9 A influência do intervalo de irrigação no rendimento absoluto e relativo de milho como função da salinidade do solo (adaptado de Shalhevet *et al.*, 1986).

salinidade, mais lixiviação deve existir para manter o rendimento da cultura elevado.

A necessidade (requerimento) de lixiviação (NL) é a fração mínima da quantidade total de água aplicada que deve passar através da zona radicular, para prevenir a redução no rendimento da cultura. Devido a condutividade elétrica (CE) ser facilmente medida e quase linearmente relacionada com a concentração salina de uma solução do solo relativamente diluída, comumente substitui-se concentração por CE.

Vários modelos tem sido proposto para relacionar a condutividade elétrica da água de drenagem requerida para algum valor prontamente disponível de salinidade do solo que é indicativo das necessidades de lixiviação das culturas. Dentre eles, pode-se destacar o modelo de Hoffman & van Genuchten (1983) que determina a média aritmética, salinidade da zona radicular média pela solução da equação da continuidade para o fluxo de água na vertical, assumindo uma função de absorção de água do solo do tipo exponencial (Raats, 1974). A conservação de massa para as condições de equilíbrio foi assumido para introduzir a concentração de sais no desenvolvimento matemático. A concentração média de sais da zona radicular ( $\bar{C}$ ) com relação da concentração de sais da água de irrigação ( $C_a$ ) é:

$$\frac{\bar{C}}{C_a} = \frac{1}{FL} + \frac{\delta}{D.FL} + \ln \left[ FL + (1 + FL).e^{-D/\delta} \right] \quad (8.16)$$

onde, D é a profundidade da zona radicular,  $\delta$  é uma constante empírica aproximadamente igual a 0,2D.

A salinidade da zona radicular média resultante da aplicação da Equação 8.16, para qualquer FL, é ilustrada na Figura 8.10. As relações dadas nesta figura foram também reduzidas à salinidade da zona radicular média para uma FL de 0,5. Esse ajustamento resulta em um relação razoável entre qualquer salinidade limiar de uma dada cultura, determinada para uma FL de aproximadamente 0,5, e a salinidade da água aplicada como função da NL. Segundo Hoffman *et al.* (1992) esse ajustamento foi feito para considerar os valores de salinidade limiar existentes, determinados a partir de experimentos de tolerância à salinidade, onde as frações de lixiviação foram mantidas próximas a 0,5. A solução gráfica relacionando a salinidade da água aplicada, salinidade limiar da cultura e necessidade de lixiviação é apresentada na Figura 8.11.

Para Rhoades *et al.* (1992), a necessidade de lixiviação é outro aspecto do manejo da irrigação, além da frequência de irrigação, que influencia a resposta das culturas à salinidade da água de irrigação que não é, também, suficientemente entendido, especialmente quando suas interações com a frequência de irrigação são juntamente considerados. Com o solo em condições de equilíbrio com a salinidade da água de irrigação, é primeiramente a interação entre concentração de sais da água de irrigação e a FL que determina a concentração e distribuição de sais na zona radicular, assim como o valor médio do potencial osmótico da água do solo, como evidencia os dados de Bower *et al.* (1969). A fração de lixiviação é também o principal fator de manejo que afeta a salinidade ponderada com a absorção de água. Isso pode ser verificado na Equação 8.17, desenvolvida por Bernstein & Francois (1973) para descrever a concentração média de sais considerando a absorção de água pela planta,  $\bar{C}$ , que é independente do padrão de absorção de água pelas raízes (Hoffman & van Genuchten, 1983).

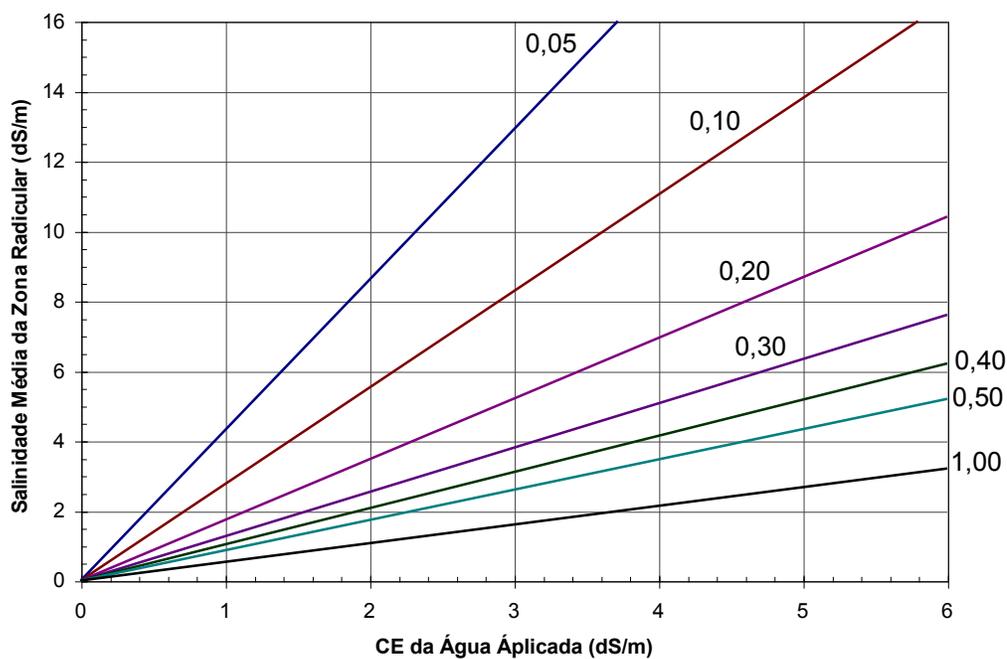


Figura 8.10 Salinidade média da zona radicular como função da salinidade da água de irrigação e FL (adaptado de Hoffman & van Genuchten, 1983).

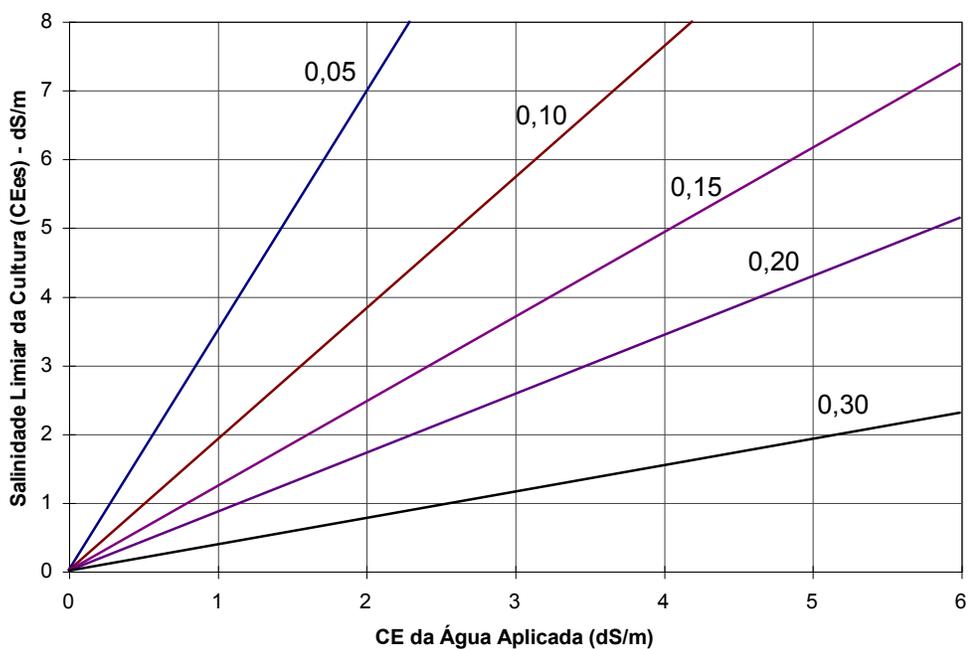


Figura 8.11 Solução gráfica para NL como função da salinidade da água de irrigação e salinidade limiar das culturas (adaptado de Hoffman & van Genuchten, 1983).

$$\bar{C} = \frac{-1}{V_a - V_r} \int_{V_a}^{V_r} C_{ad} = \frac{C_a}{1 - FL} \cdot \ln\left(\frac{1}{FL}\right) \quad (8.17)$$

onde,

$V_a$  e  $V_r$  - volume de água de irrigação infiltrado e drenado, respectivamente;

$C_a$  e  $C_r$  - concentrações das águas de irrigação e drenada, respectivamente;

FL - fração de lixiviação, que é a relação entre a lâmina drenada e a de irrigação.

A equação acima aplica-se somente para a condição em que ocorre conservação de massa, ou seja,  $C_a \cdot V_a = C_r \cdot V_r$ . Entretanto, segundo Ingvalson *et al.* (1976), pode ser modificada para considerar efeitos de precipitação ou dissolução de sais como segue:

$$\bar{C} = a - \frac{b}{(1 - FL)} \cdot \ln(FL) + \frac{c}{FL} \quad (8.18)$$

onde, a, b, c são constantes empíricas da equação polinomial de 2ª ordem, que descreve a concentração da solução do solo para uma dada água de irrigação como função de (1/FL) derivada do modelo “Watsuit” (Rhoades *et al.*, 1992).

Segundo Raats (1974),  $\bar{C}$  não é corretamente descrito pelas equações acima, quando a dispersão e difusão afetam apreciavelmente a distribuição de sais na zona radicular.

Pelo fato de  $\bar{C}$  está mais intensivamente relacionado com  $C_a$  do que com a FL, Bersntein & Francois (1973) concluíram que o crescimento das culturas é mais sensível a  $C_a$  do que a salinidade média da zona radicular e que os níveis de salinidade nas camadas mais profundas da zona radicular têm menores efeitos sobre o rendimento. Isso contempla os efeitos que a FL e frequência de irrigação podem ter sobre as distribuições dos potenciais mátrico e osmótico na zona radicular e, então, sobre a resposta das culturas à salinidade, quando há secamento significativo entre as irrigações. No caso do potencial mátrico desprezível, como no caso de irrigação de alta frequência,  $\bar{C}$  é provavelmente o melhor índice de salinidade para avaliar a resposta da cultura, ao invés do valor médio da zona radicular (média aritmética com a profundidade), que provavelmente seja o melhor índice para irrigações pouco frequentes (Rhoades *et al.*, 1992).

Para culturas específicas e aproximações mais exatas de NL, pode-se utilizar a seguinte equação (Rhoades, 1974):

$$NL = \frac{CE_a}{5 \cdot CE_{es}^* - CE_a} \quad (8.19)$$

onde, NL é necessidade de lixiviação mínima que se necessita para controlar os sais dentro do limite de tolerância da cultura, empregando-se métodos de irrigação convencional;  $CE_a$  é a salinidade da água de irrigação em  $dS \cdot m^{-1}$ ; e  $CE_{es}^*$  é a salinidade média do extrato de saturação do solo, em  $dS \cdot m^{-1}$ , que representa a salinidade tolerada pela cultura considerada.

Deduz-se esta equação a partir da definição de necessidade de lixiviação para uma cultura, que é a relação entre a concentração de sais da água de irrigação e a concentração da água de drenagem máxima tolerada pela cultura ( $CE_r = 2.CE_{es}$ ). Além disso, considera que a salinidade média da zona radicular, expressa em  $CE_{es}$ , é dada pela média entre a CE da superfície do solo ( $CE_a/2$ ) e CE do fundo da zona radicular ( $CE_r/2$ ), multiplicada por um fator de forma de aproximadamente 0,8 (Bower *et al.*, 1969).

A necessidade de lixiviação (NL) para o controle da salinidade também pode ser determinada usando as relações apresentadas na Figura 8.12, a tolerância da cultura e a salinidade da água de irrigação, e tipo de manejo da irrigação (Rhoades, 1977, 1982). A curva estabelecida para “irrigação convencional” é usada onde o solo pode ser deixado secar entre as irrigações, isto é, onde o estresse matricial significativo ocorre junto com o estresse osmótico induzido pela salinidade; a curva para “irrigação com alta frequência” é usada onde o solo não seca significativamente entre irrigações. Inerente a essas duas curvas, está a mudança no índice de salinidade usado para relacionar a resposta da cultura à salinidade. A salinidade média na zona radicular (média aritmética) é usada para “irrigação convencional”, enquanto a salinidade da zona radicular ponderada com a absorção de água da cultura é usada para irrigações de alta frequência. Smith & Handock (1986) apresentaram a mesma relação e aproximação como a de Rhoades (1982) para calcular NL. Eles sugeriram que a relação ponderada com a extração de água do solo é o único método aceitável para calcular NL. Os resultados da avaliação recente feita por Bresler (1987) quanto a resposta da cultura à salinidade e manejo da irrigação, pode ser interpretada como suporte do conceito de “NL dual” de Rhoades (1982). O conceito de “NL dual” é um caminho indireto de ajustamento da NL para os efeitos do estresse mátrico sobre a resposta da cultura à salinidade e é recomendado para isso, até que um método mais convincente seja desenvolvido (Rhoades & Loveday, 1990). Então, torna-se necessário desenvolver um modelo simplificado que integre adequadamente a resposta das plantas à variação da salinidade, ao estresse hídrico e ao manejo da irrigação no tempo e no espaço, bem como a tolerância mais apropriada da cultura a dada salinidade do que as informações hoje disponíveis (Bresler & Hoffman, 1986; Bresler, 1987).

#### **8.3.4 Frequência de lixiviação**

Altas concentrações de sais na porção inferior da zona radicular das culturas pode ser tolerada com efeitos mínimos no rendimento, quando a porção superior é mantida com teor de sais relativamente baixo (Bernstein & Francois, 1973). As plantas compensam reduzindo a absorção de água da zona mais salina e aumentando a absorção da zona menos salina (Shalhevet & Bernstein, 1968, entre outros). Embora essa compensação possa ocorrer sem redução de rendimento, questões freqüentemente levantadas são: (i) quanto de sais pode ser armazenado na zona radicular antes que a lixiviação seja necessária e (ii) quantas vezes água em excesso deve ser aplicada para proporcionar lixiviação.

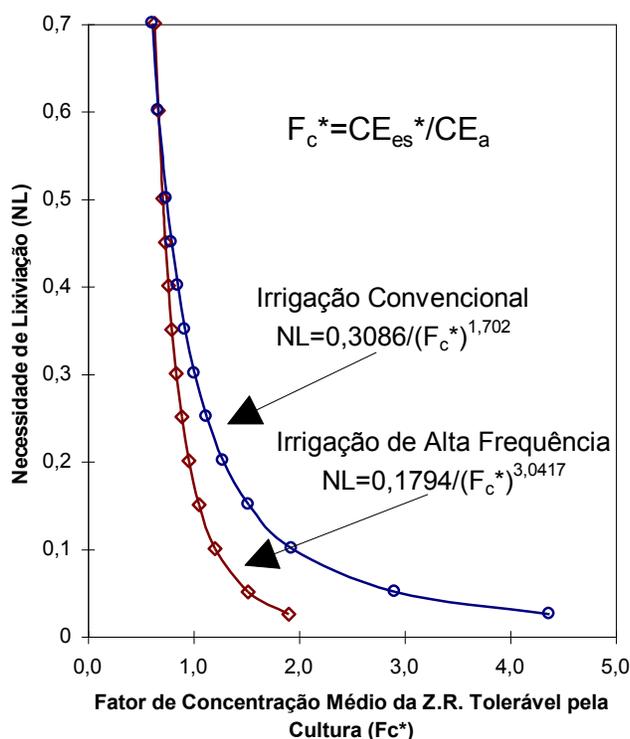


Figura 8.12 Relação entre a FL e o fator de concentração ( $F_c^*$ ) permissível na zona radicular para ser usado na determinação da NL em função do manejo da irrigação (Rhoades, 1982).

Alternativamente, pode-se determinar o fator de concentração ( $F_c^*$ ) de água da solução do solo, tendo-se a FL e sabendo-se o manejo da irrigação (Tabela 8.2)

Tabela 8.2. Concentração da solução do solo (CEes) em relação à concentração da água de irrigação (Fc), em função da FL (Rhoades & Loveday, 1990).

Faixa da Zona Radicular	Fração de Lixiviação					
	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
	Média Aritmética <sup>1</sup>					
Quarta Parte Superior da Z.R.	0,65	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56
Zona Radicular Completa	2,79	1,88	1,29	1,03	0,87	0,77
	Média Ponderada com a Absorção <sup>2</sup>					
Zona Radicular Completa	1,79	1,35	1,03	0,87	0,77	0,70

<sup>1</sup> Usa-se para manejo de irrigação convencional.

<sup>2</sup> Usa-se para irrigação manejada com alta frequência.

A maioria das águas de irrigação apresentam salinidade que, mesmo sem lixiviação, muitas irrigações possam ser aplicadas antes que a salinidade atinja níveis prejudiciais às culturas. Esse atraso na lixiviação é, claro, depende da tolerância da cultura; mais tolerante

a cultura, maior o atraso. Um exemplo de atraso da lixiviação, foi o experimento de lisímetro em casa de vegetação com alfafa usando água de irrigação de 1 dS/m, em perfis de solo franco arenoso de 0,6, 1,2 e 1,8 m de profundidade, durante 9, 14 e 20 meses, respectivamente (Francois, 1981). O rendimento foi reduzido menos de 25%, embora mais de 14, 30 e 45 Mg.ha<sup>-1</sup> de sais fossem armazenados na metade inferior dos três perfis sem lixiviação. Assim, quanto mais profundo for o solo, maior será a capacidade de armazenar sais, com redução mínima de rendimento. Reduções drásticas de rendimento somente ocorreram quando os sais começaram a se acumular na porção superior da zona radicular.

Considerando a salinidade do solo, Meiri & Shalhevet (1973) concluíram que lixiviações mais frequentes proporcionaram maiores salinidades no final do experimento.

#### **8.4 AVALIAÇÃO DA ADEQUABILIDADE DA ÁGUA SALINA PARA IRRIGAÇÃO E PRODUÇÃO AGRÍCOLA**

Segundo Rhoades *et al.* (1992), as condições de equilíbrio não ocorrem na maioria das situações encontradas na agricultura irrigada. Nesse caso, são necessários tipos de modelos dinâmicos um tanto complicados (Bresler & Hoffman, 1986; Letey & Dinar, 1986; Bresler, 1987; Letey *et al.*, 1990; entre outros) para levar em conta as variáveis climáticas, culturas, solos, água, atmosfera, manejo de irrigação e tempo relacionando as variáveis que influenciam o potencial total da água e seus componentes. Entretanto, segundo Rhoades *et al.* (1992), a maioria dos dados de entrada requeridos por esses modelos são geralmente não disponíveis para muitas aplicações práticas e existem muitas incertezas a respeito de como relacionar a resposta das culturas à salinidade e ao potencial mátrico variando no tempo e espaço, tal como pode ser previsto com esses modelos. Por essas razões, modelos conceitualmente inferiores, como para condições de equilíbrio, podem ser mais apropriados para avaliar a adequabilidade da água de irrigação. No caso destes modelos simplificados, provavelmente, fornece a pior situação que resultaria da irrigação com uma determinada água. Então, Rhoades & Loveday (1990) e Rhoades *et al.* (1992) recomendam um modelo para condições de equilíbrio relativamente simples denominado “Watsuit”, que avalia a adequabilidade da água para irrigação sob uma condição expressiva de referência, isto é, de equilíbrio dinâmico, a provável pior situação que resultaria de seu uso. O programa “Watsuit” pode ser adquirido junto à FAO.

##### **8.4.1 Uso do modelo computacional “Watsuit”**

As concentrações dos principais cátions e ânions na solução do solo numa zona radicular irrigada são previstos para as condições de equilíbrio pelo “Watsuit” como uma função da composição da água de irrigação, fração de lixiviação, presença ou ausência de CaCO<sub>3</sub> no solo e várias alternativas de aplicação de corretivos para corrigir problemas de sódio. Também são previstos a RAS<sub>as</sub>, pH e CE<sub>as</sub> na superfície do solo e em toda zona radicular. O sub-índice “as” refere-se à solução do solo, quando o mesmo está a um teor de umidade real nas condições de campo. Normalmente assume-se como a umidade à capacidade de campo.

Prognósticos da adequabilidade da água para irrigação são feitos por comparação entre a composição salina e sodicidade da água do solo previstos pelo “Watsuit” e os padrões de aceitação com respeito à salinidade, permeabilidade e encrostamento e critérios

de toxicidade. O efeito da frequência de irrigação é indiretamente levado em conta, considerando o índice de salinidade usado para julgar o risco de salinidade potencial, ou seja, adota-se a média aritmética do perfil para irrigações convencionais, e a média ponderada com a absorção para irrigações de alta frequência. Para avaliar os problemas de toxicidade, substitui-se a CE pelas concentrações dos íons (Cl e B). Com respeito aos problemas de permeabilidade e encrostamento, a RAS da superfície do solo e a CE da água que infiltra são comparados contra as relações limite apropriadas entre RAS (ou PST) e  $CE_a$  para os solos concernentes (Figuras 8.13 ou 8.14, podem ser adotadas). Estas figuras utilizam como parâmetro, a relação de adsorção de sódio corrigida ( $RAS^o$ ), que considera a precipitação ou dissolução do  $CaCO_3$  na superfície do solo. Detalhes sobre sua determinação são dados no Capítulo 5.

As predições da CE,  $\bar{C}$  e  $\bar{\pi}$  pelo “Watsuit” são dados em termos de água do solo à capacidade de campo. Assim, algumas conversões em unidades são requeridas antes destes valores serem avaliados:

$$CE_{es} \approx \frac{1}{2} CE_{as} \quad (8.20)$$

$$\bar{CE} \approx 0,1 \bar{C} \quad (8.21)$$

$$\bar{\pi} \approx 39 \bar{CE} \quad (8.22)$$

onde, CE é dado em  $dS \cdot m^{-1}$ ;  $\bar{C}$ , em  $mmol_c \cdot l^{-1}$  e  $\bar{\pi}$ , em kPa.

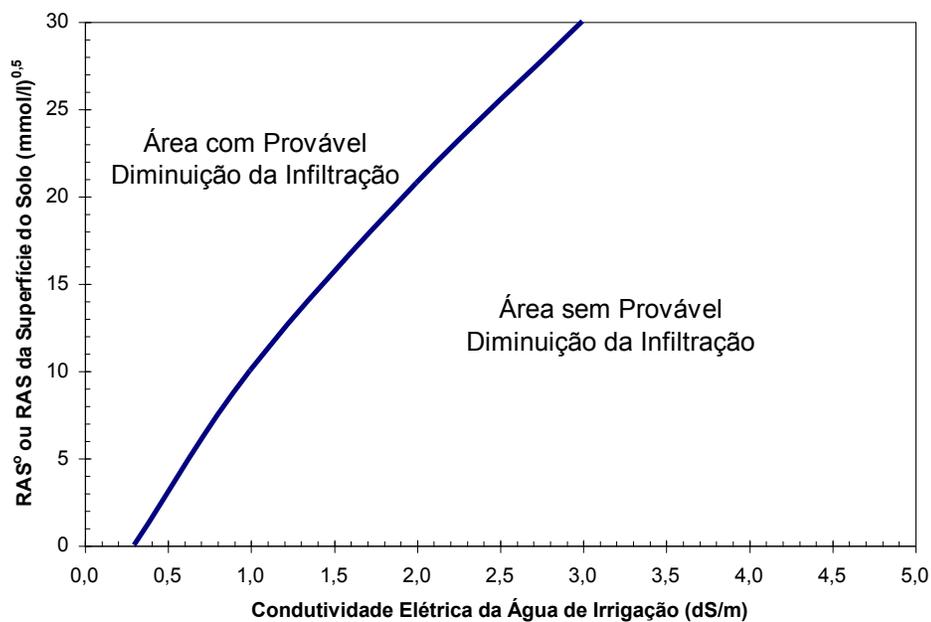


Figura 8.13 Valores limites da RAS<sup>o</sup> (ou da RAS na superfície do solo) e CE da água de irrigação associados à probabilidade de redução substancial na infiltração da água no solo (adaptado de Rhoades, 1982).

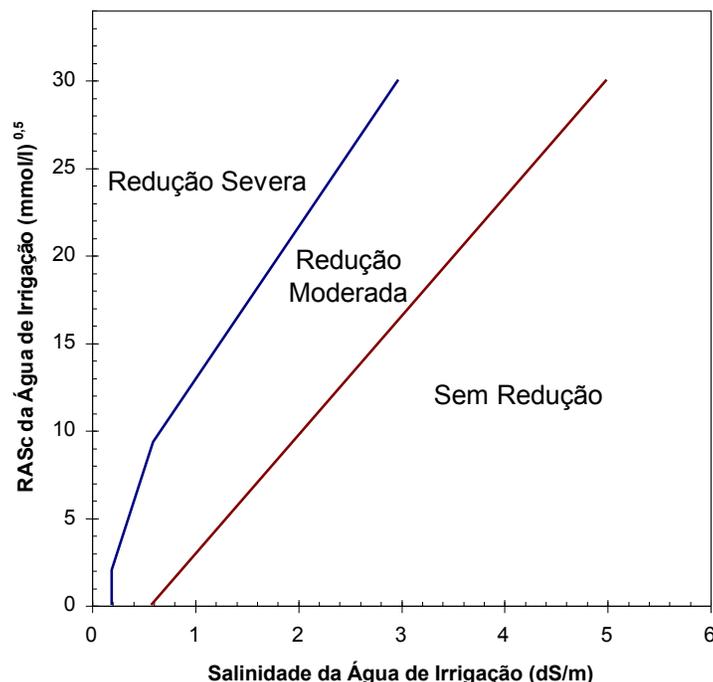


Figura 8.14 Redução relativa da infiltração, provocada pela salinidade e relação de adsorção de sódio corrigida da água de irrigação (Ayers & Westcot, 1991).

#### 8.4.2 Uso da versão não computacional do modelo Watsuit

Com esse procedimento, para condições de equilíbrio, a salinidade ou concentração iônica é estimada multiplicando a CE ou concentração iônica da água de irrigação pelo fator de concentração relativo,  $F_c$ , apropriado para a FL e profundidade da zona radicular. Esse fator de concentração pode ser calculado conforme procedimento apresentado na tabela 8.1, adotando  $CE_a = 1,0$  e os valores de  $CE_{cc}$  como sendo  $F_c$ . Também, esses fatores são dados na Tabela 8.3 para um padrão de absorção normal de água pelas raízes da planta (40-30-20-10) e FL de 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5.

Tabela 8.3 Concentração de sais da água do solo em relação à água de irrigação ( $F_c=1/FL$ ) em função da profundidade da zona radicular e fração de lixiviação.

Profund. em Quartos	Vol. Ac. Absorv. (%)	Fração de Lixiviação					
		0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
0	0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	40	1,61	1,56	1,47	1,39	1,32	1,25
2	70	3,03	2,70	2,27	1,96	1,72	1,54
3	90	7,14	5,26	3,57	2,70	2,17	1,82
4	100	20,00	10,00	5,00	3,33	2,50	2,00

Essas predições são menos exatas do que aquelas feitas pelo programa “Watsuit” e são mais conservadoras, pois não leva em conta os efeitos das reações de precipitação-dissolução dos minerais ou formação de par iônico, no resultado da salinidade e composição iônica da água do solo.

Para  $FL > 0,20$ , as precipitações de calcita e gesso podem ser consideradas desprezíveis para efeito de avaliação (Rhoades *et al.*; 1992). Quando a água de irrigação apresenta teores consideráveis de Ca e  $HCO_3$  ou  $SO_4$  e não se adotam altas FL é aconselhável se avaliar as precipitações de  $CaSO_4$  e  $CaCO_3$ , pois, por um lado é benéfico, reduzindo a salinidade prevista, por outro, é prejudicial com respeito a sodicidade do solo, pois aumenta a concentração relativa de sódio em relação a de cálcio.

Na ausência do programa computacional Watsuit, Rhoades *et al.* (1992) recomenda o uso do método gráfico de Suarez (1982).

Esse procedimento calcula as perdas (ou ganhos) de Ca,  $HCO_3$  e  $SO_4$  e suas concentrações finais de equilíbrio na solução do solo resultante da irrigação sob condições de equilíbrio. Primeiro determina-se as concentrações iniciais (sem perda ou ganho) da água do solo, isto é,  $(Fc \cdot Ca_a / 2)$ ,  $(Fc \cdot HCO_{3_a})$  e  $(Fc \cdot SO_{4_a} / 2)$ , onde Fc é o fator de concentração que pode ser obtido na Tabela 8.3 para cada profundidade em função de FL e o “2” é para transformar a concentração em mmol/l para mmol/l. Em seguida, estima-se a atividade iônica ( $\mu$ ) da água do solo nas diferentes profundidades:

$$\mu = 0,0127 \cdot CE_a \cdot Fc \quad (8.23)$$

Usando-se  $\mu$  e uma estimativa apropriada da pressão parcial de  $CO_2$  [ $P(CO_2)$ ], obtém-se o valor de escala (Tabela 8.4) apropriado para usar no cálculo das perdas (ou ganho) de Ca nos sistemas controlados por  $CaCO_3$ , isto é, para águas tipo alcalina onde  $HCO_3 > Ca$  e  $HCO_3 > SO_4$ . A  $P(CO_2)$  no solo varia consideravelmente e é uma função da temperatura, teor de umidade do solo, textura e porosidade do solo, frequência de irrigação, fertilidade do solo e tipo de cultura, entre outros. Para a superfície do solo, usa-se  $P(CO_2) = 10^{-3,5}$  atm (0,03 kPa); para a parte da zona radicular mais profunda, na ausência de informações específicas, usa-se valores de 1 e 3 kPa para solos arenosos e argilosos, respectivamente. Segundo Rhoades & Loveday (1990), o programa “Watsuit” adota para  $P(CO_2)$  os seguintes valores: 0,07; 0,5; 0,15; 2,3 e 3,0 kPa.

Tabela 8.4 Valores de escala usados na determinação das linhas de solubilidade nas Figuras 8.15 e 8.16 (Suarez, 1982).

$\mu^1$	P( $\text{CO}_2$ ) - kPa										$-\log(\gamma_{\text{Ca}} \cdot \gamma_{\text{SO}_4})$
	0,03	0,10	0,32	0,63	1,00	3,16	6,31	10,0	31,6	100	
0,001	0,09	0,59	1,09	1,39	1,59	2,09	2,39	2,59	3,09	3,59	0,12
0,002	0,14	0,64	1,14	1,44	1,64	2,14	2,44	2,64	3,14	3,64	0,17
0,005	0,20	0,70	1,20	1,50	1,70	2,20	2,50	2,70	3,20	3,70	0,26
0,007	0,23	0,73	1,23	1,53	1,73	2,23	2,53	2,73	3,23	3,73	0,60
0,010	0,27	0,77	1,27	1,57	1,77	2,27	2,57	2,77	3,27	3,77	0,35
0,020	0,35	0,85	1,35	1,65	1,85	2,35	2,65	2,85	3,35	3,85	0,47
0,030	0,42	0,92	1,42	1,72	1,92	2,42	2,72	2,92	3,42	3,92	0,55
0,040	0,46	0,96	1,45	1,76	1,96	2,45	2,76	2,96	3,46	3,96	0,61
0,050	0,50	1,00	1,50	1,80	2,00	2,50	2,80	3,00	3,50	4,00	0,66
0,070	0,57	1,07	1,57	1,87	2,07	2,57	2,87	3,07	3,57	4,07	0,75
0,100	0,64	1,14	1,64	1,94	2,14	2,64	2,94	3,14	3,64	4,14	0,84
0,150	0,72	1,22	1,72	2,02	2,22	2,72	3,02	3,22	3,72	4,22	0,95
0,200	0,78	1,28	1,78	2,08	2,28	2,78	3,08	3,28	3,78	4,28	1,03
0,250	0,83	1,33	1,83	2,13	2,33	2,83	3,13	3,33	3,83	4,33	1,09
0,300	0,87	1,37	1,87	2,17	2,37	2,87	3,17	3,37	3,87	4,37	1,14
0,400	0,92	1,42	1,92	2,22	2,42	2,92	3,22	3,42	3,92	4,42	1,22
0,500	0,96	1,46	1,96	2,26	2,46	2,96	3,26	3,46	3,96	4,46	1,27

<sup>1</sup> Calculado como  $0,0127 \cdot \text{CE}_a \cdot \text{F}_c$ .

Localizado o “valor de escala” na Figura 8.15, traça-se uma linha paralela a linha reta mostrada na figura. Agora plota-se o valor de  $(F_c \cdot \text{Ca}_a / 2)$  e  $(F_c \cdot \text{HCO}_3)_a$  para localizar o ponto inicial que representa as concentrações de Ca e  $\text{HCO}_3$  na água do solo antes da reação. Depois move-se este ponto paralelo as linhas curvas mais próximas na direção da linha reta traçada até interceptá-la. Este ponto representa os valores de Ca e  $\text{HCO}_3$  em equilíbrio, negligenciando-se o íon carbonato e complexações. Assim, as perdas (ou ganhos) da concentração de Ca é igual a diferença  $(\text{Ca}_a \cdot F_c / 2 - \text{Ca}_e)$ . As perdas correspondentes na CE (dS/m) é igual ao produto da diferença por 0,2. O fator 0,2 corrige para a conversão entre mmol/l e  $\text{mmol}_c/\text{l}$  e entre  $\text{mmol}_c/\text{l}$  e CE (dS/m).

Para sistemas gipsíferos, usa-se um procedimento análogo ao descrito acima para os sistemas de  $\text{CaCO}_3$ . Então calcula-se as perdas (ou ganho) de Ca e  $\text{SO}_4$  e as concentrações de equilíbrio final nas soluções do solo sob condições de equilíbrio. Nesse caso, como antes, primeiro obtém-se o “valor de escala” na última coluna da Tabela 8.4 para o valor correspondente de  $\mu$  (como calculado pela Equação 8.22). Em seguida, traça-se uma linha paralela a linha reta mostrada na Figura 8.16 passando no ponto do “valor de escala” determinado na tabela. Os valores de  $(F_c \cdot \text{Ca} / 2)$  e  $(F_c \cdot \text{SO}_4 / 2)$  são plotados nessa figura para localizar as concentrações iniciais (antes do equilíbrio) naquela profundidade de solo. Esse ponto é movido paralelo as curvas mais próximas até interceptar a linha reta traçada. Os valores de Ca e  $\text{SO}_4$  correspondente ao ponto de interseção são suas concentrações (em mmol/l) em equilíbrio no sistema controlado pelo gesso ( $\text{Ca}_e$  e  $\text{SO}_{4e}$ ), respectivamente. As perdas (ou ganhos) na salinidade ( $\text{CE}_{\text{as}}$ ) é igual a  $0,2[(\text{Ca}_a \cdot F_c) - \text{Ca}_e]$ . Teoricamente, sistemas em equilíbrios simultâneos com  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CaCO}_3$ , requer o uso das Figuras 8.15 e 8.16 e interações sucessivas para determinar as concentrações finais de Ca,  $\text{HCO}_3$  e

SO<sub>4</sub>. Os valores iniciais de Ca e HCO<sub>3</sub> são primeiro obtidos na Figura 8.15. As concentrações de Ca e SO<sub>4</sub>, corrigidas para precipitação de gesso, são calculados em seguida na Figura 8.16 usando o Ca obtido da Figura 15 e a concentração inicial de SO<sub>4</sub> como  $(SO_{4a} \cdot Fc / 2)$ . Esse processo é repetido sucessivamente até valores consistentes de Ca sejam obtidos em ambas figuras. Esses cálculos podem também ser corrigidos para os efeitos dos pares iônicos.

Na avaliação da adequabilidade da água de irrigação com respeito a problemas de permeabilidade, quando a água tem relação de adsorção do sódio (RAS) e concentração de HCO<sub>3</sub> elevados, mas relativamente baixos níveis de CE, o valor de RAS ajustado (RAS<sub>aj</sub>) deveria ser usado no lugar de RAS da água de irrigação (RAS<sub>a</sub>), como sugerido por Suarez (1981, 1982) e Jurimak & Suarez (1990):

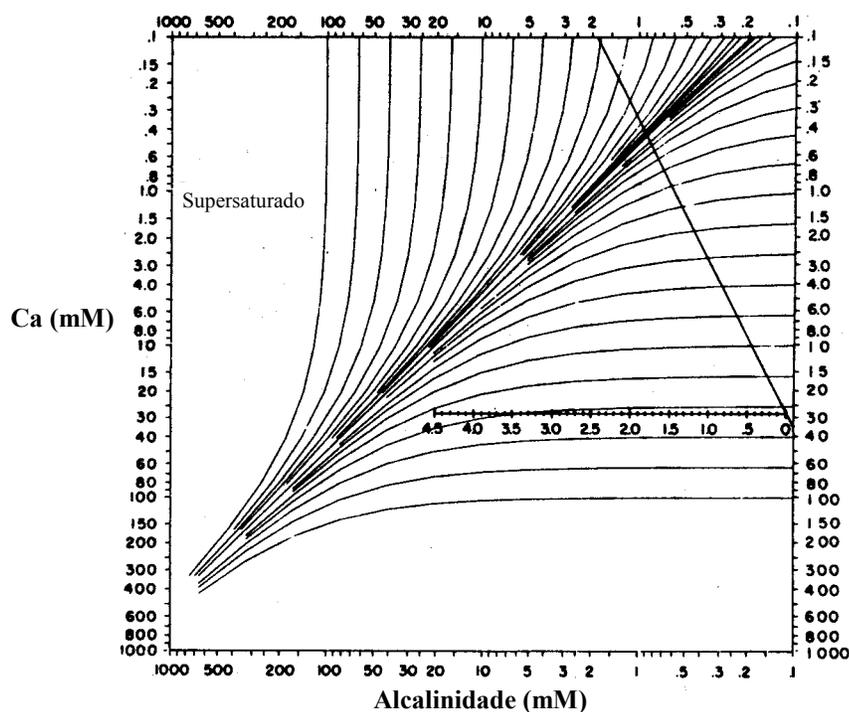


Figura 8.15 Solução gráfica da solubilidade do CaCO<sub>3</sub>, dadas a concentração de Ca e a alcalinidade do carbono inorgânico (Suarez, 1982).

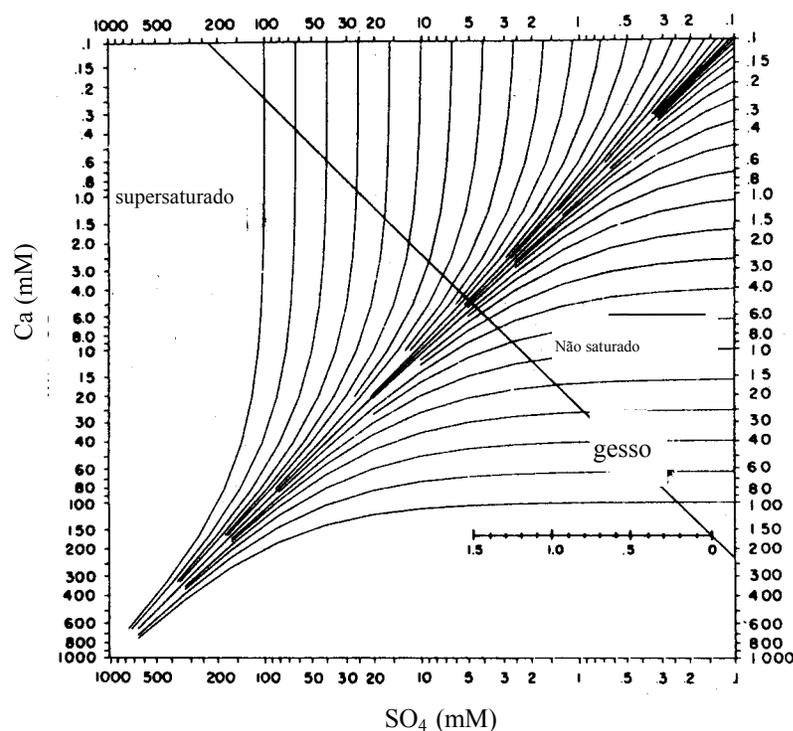


Figura 8.16 Solução gráfica da solubilidade do gesso, dadas as concentrações de Ca e  $\text{SO}_4$  (Suarez, 1982).

$$\text{RAS}_{aj} = \frac{\text{Na}_a \cdot \text{Fc}}{\sqrt{(\text{Mg}_a \cdot \text{Fc} + 2 \cdot \text{Ca}_e) / 2}} \quad (8.23)$$

onde  $\text{Ca}_e$  é a concentração de Ca em equilíbrio na solução do solo, em mmol/l, e  $\text{Na}_a$  e  $\text{Mg}_a$  (mmol<sub>c</sub>/l) são as concentrações de Na e Mg na água de irrigação. Quando se deseja avaliar o problema de infiltração usa-se  $\text{Fc}=1$  (fator para a superfície do solo). Neste caso,  $\text{Ca}_e$  corresponde a metade do valor de  $\text{Ca}^0$ , apresentado no capítulo 5, sendo o  $\text{RAS}_{aj}$  igual o  $\text{RAS}^0$ .

## 8.5 PRÁTICAS DE MANEJO EM ÁREAS AFETADAS POR SAIS

O manejo da salinidade constitui-se um importante aspecto quando se utiliza água de irrigação salina. Isto requer um entendimento de como os sais afetam as plantas e solos, de como os processos hidrológicos afetam a acumulação de sais e, também, de como os tratamentos culturais e irrigação afetam a salinidade do solo e da água. Os efeitos básicos dos sais no solo e nas plantas e as causas e processos de salinização em áreas irrigadas foram discutidos nos itens anteriores e nos capítulos 1 e 4.

### **8.5.1 Irrigação e controle da salinidade**

A salinidade média ao longo do tempo na zona radicular é afetada pelo grau com que a água do solo é diminuída entre as irrigações, bem como pela fração de lixiviação (FL). Quanto maior o intervalo entre as irrigações, maior é a redução no teor de água do solo e conseqüente aumento da concentração dos sais na solução do solo, diminuindo os potenciais mátrico e osmótico da água do solo. A absorção de água (uso consuntivo) e rendimento da cultura são intimamente relacionados ao valor médio com a profundidade do potencial total da água do solo, isto é, mátrico mais osmótico (Rhoades *et al.*, 1992). Como a água é removida do solo com uma distribuição de salinidade não uniforme, o potencial total da água que é absorvida pela planta tende a uma aproximação uniforme em toda profundidade da zona radicular. Depois da irrigação, as raízes da planta preferencialmente absorvem água das partes da zona radicular que apresenta potencial alto de água. Normalmente isto indica que a maioria da absorção de água é inicialmente da camada mais superficial da zona radicular, até que água suficiente seja removida para aumentar o estresse total de água a um nível igual ao das camadas mais profundas. Depois que a água é removida da camada mais profunda, onde o solo é mais salino, é que o efeito do solo no desenvolvimento da cultura é aumentado. Daí implica que:

- Os métodos de irrigação que minimiza o estresse mátrico, como irrigação por gotejamento, pode ser usado para reduzir os efeitos nocivos da irrigação com água salina em solos salinos;
- As frações de lixiviação altas podem ser usadas para minimizar a acumulação de níveis elevados de salinidade em regiões mais profundas da zona radicular.

A irrigação deve ser adequada, ao longo do tempo, para prevenir acumulação de sais na zona radicular. Para evitar elevação do lençol frático, que freqüentemente contribui para acumulação de sais na superfície do solo, aplicações de irrigação não devem ser excessivas. A lâmina infiltrada de água deve ser relativamente uniforme para satisfazer as necessidades da cultura e lixiviação adequada, sem escoamento superficial nem percolação profunda excessivos. Para satisfazer essas necessidades de lâminas e uniformidade, os sistemas de irrigação devem ser adequados para o local e bem projetados e manejados (Kruse *et al.*, 1990).

***Irrigação por superfície:*** Nos sistemas de irrigação por superfície, tais como sulco, faixas e inundação, a água derivada a parcela corre sobre a superfície do terreno e parte infiltra-se quando está acontecendo a fase de avanço. Quando a água avança até o fim da parcela, pode ocorrer “runoff” ou a água pode se acumular na superfície do solo. Esta água acumulada na superfície continuará até que a vazão de entrada deixe de ser fornecida e toda água superficial tenha infiltrado. Para se ter uma infiltração uniforme, a variabilidade do solo ao longo do terreno deve ser pequena e o tempo de oportunidade deve ser uniforme em toda parte da parcela irrigada.

Uma prática comum em áreas irrigadas por superfície é a sistematização e nivelamento do terreno. Com isso, aumenta a uniformidade de distribuição de água em toda superfície de solo irrigado, melhorando a eficiência de aplicação de água e, portanto, reduzindo a percolação profunda, exclusiva em partes do terreno e, ao mesmo tempo, mantendo a FL uniforme na área irrigada. Um problema que pode surgir, quando se realiza

a sistematização, é a possibilidade de precisar promover cortes profundos no solo, podendo descobrir camadas de solo mais salinas ou impermeáveis ou de baixa fertilidade. Por isso, antes de se realizar esta prática, convém fazer um levantamento criterioso do solo da área para verificar se há tais problemas. Quando existem, uma alternativa é juntar o solo superficial cortado, aprofundar os cortes, quebrando camadas impermeáveis, se existir, e recolocar o solo superficial cobrindo toda a área.

Nos sistemas de irrigação por superfície, o tempo de oportunidade normalmente é maior na cabeceira da parcela do que no final e, então a lâmina de água infiltrada no início da parcela tende ser maior. Assim, se pretender repor a água no final da parcela, poderá ter percolação profunda excessiva no início da parcela.

A água infiltrada em sulcos não é distribuída uniformemente na direção perpendicular, devido as condições de solo não uniforme e a geometria do sulco variável. Em alguns solos, o movimento da água infiltrada do sulco para os camalhões adjacentes é limitado. Isso não produz problemas para plantas com sistemas radiculares bem formados, mas pode ser complicado durante a germinação das sementes, causando estresse nas plantas jovens. Nestes casos, sulcos mais rasos ou tempos de aplicação de água maiores podem ser adotados para aumentar o movimento lateral da água para o centro dos camalhões.

No sistema de irrigação por sulco, a salinidade varia amplamente do fundo do sulco para as partes mais alta do camalhão. A Figura 8.17 mostra padrões típicos de acumulação de sais no camalhão formado entre os sulcos. Ela ilustra o local de semeadura onde as plantas jovens podem evitar as concentrações mais elevadas de sais. Aração ou outro tipo de preparo de solo pode redistribuir esses sais e assim permitir o próximo cultivo.

No caso da irrigação por sulco, esse problema de uniformidade pode ser resolvido usando-se sulcos maiores para tempos de avanço maiores ou reduzindo o comprimento do sulcos. Se necessário, pode ser utilizado sistemas com reutilização da água de “runoff”. Para irrigação em faixa, a uniformidade de infiltração pode ser conseguida se a declividade transversal é pequena e o perfil na direção do fluxo tem declividade uniforme ou é levemente convexa. O tamanho da faixa e duração da irrigação, muitas vezes, precisam ser ajustados para as condições de infiltração e rugosidade da área que se apresentam no momento de cada aplicação de água.

Em irrigação por inundação, a parcela tem que ser bem nivelada e a vazão e o

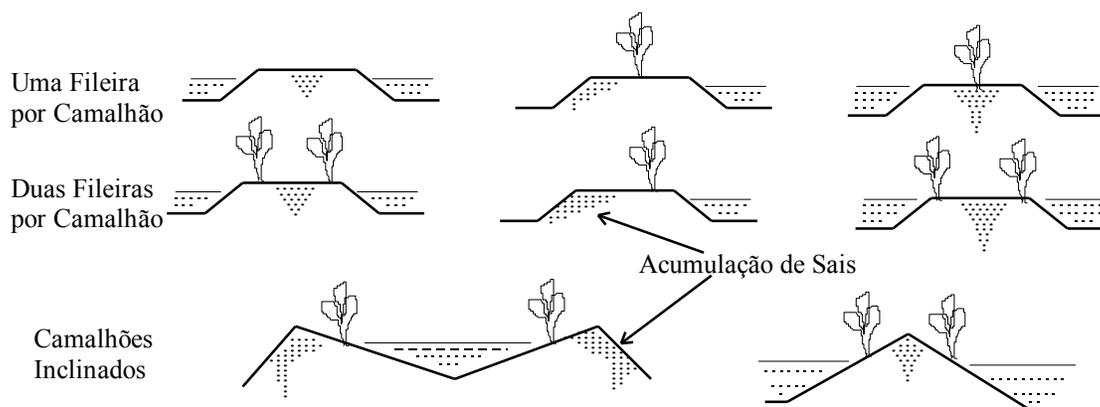


Figura 8.17 Padrões de acumulação de sais nos camalhões de sulcos de irrigação (Kruse *et al.*, 1990).

volume de água aplicados devem ser apropriados para o tamanho das bacias e condições do solo. A lâmina de irrigação deve ser grande o suficiente para inundar a superfície da bacia em uma fração de tempo necessária para a lâmina líquida desejada se infiltrar.

***Irrigação por aspersão:*** Além da seleção de aspersores e espaçamento adequados para as condições de vento da região e pressão do sistema, para se ter uma uniformidade de distribuição de água elevada, a taxa de aplicação de água deve ser inferior a capacidade de infiltração do solo, para não permitir escoamento superficial e se ter infiltração uniforme em toda área. Neste método de irrigação, normalmente não há acumulação de sais em partes isoladas na superfície do solo.

***Irrigação localizada:*** Refere-se aos sistemas de irrigação que distribui água pontualmente, como o gotejamento, microaspersão e irrigação subsuperficial. Uma característica comum destes sistemas é molhar apenas uma fração de solo e permitir aplicações bastante freqüentes. Como consequência do umedecimento do solo pelos sistemas de irrigação localizada, a concentração de sais se dar na superfície do solo e no contorno do bulbo molhado.

O manejo dos diferentes métodos de irrigação freqüentemente depende das características das culturas. Aspersão temporária são algumas vezes usadas na germinação e estabelecimento de culturas sensíveis à salinidade. Aspersores podem aplicar pequenas lâminas de água uniformemente, mantendo o leito de sementeira adequadamente úmido e livre de sais. Assim, a irrigação por superfície é adotada para as fases posteriores de desenvolvimento. A aspersão pode ser problema quando se utiliza água salina em cultura que é sensível a salinidade via foliar.

### ***8.5.2 Manejo Agrônomico***

***Seleção de culturas:*** As plantas e cultivares toleram diferentemente a salinidade do solo (ver capítulo 4). A rentabilidade da produção agrícola pode ser aumentada pela seleção da cultura apropriada para as condições de salinidade local. Meiri & Plaut (1985) examinaram práticas que maximizaram o rendimento sob condições salinas.

***Práticas de Plantio:*** Aração profunda pode redistribuir sais no perfil do solo. A prática deveria ser avaliada numa pequena área antes de arar a área completa. Camadas de solo pouco permeável que impede o movimento de água através da zona radicular pode ser destruída através da subsolagem.

As técnicas de cultivo mínimo deixa a parte alta entre os sulcos coberta de plantas, ficando assim para o próximo cultivo. Plantando nessas elevações, as sementes podem ficar na parte mais salina do perfil de solo. Também, a escarificação do camalhão, um método do cultivo mínimo de sementeira profunda, pode ser usado para proporcionar um leito de sementeira adequado para culturas em linha. Os resíduos orgânicos sobre o solo pode ser um problema na irrigação por sulco, porque aumenta o tempo de avanço. Como solução pode-se adotar a irrigação por impulso (“surge flow”).

**Frequência de Irrigação:** O manejo da irrigação é importante quando considera-se problemas potenciais de salinidade. A escolha do momento da irrigação pode evitar potenciais mátricos baixo da água do solo e como consequência concentrações relativamente mais elevadas. Irrigações frequentes também mantêm o movimento dos sais através e para fora da zona radicular. Se as irrigações são aplicadas frequentemente, cada irrigação deve ser pequena, o que raramente pode ser aplicada pelos sistemas de superfície.

Atualmente, pode-se estimar a evapotranspiração diária, de modo que as irrigações podem ser realizadas com alta frequência.

Como os sistemas de irrigação localizada produzem concentrações elevadas de sais na superfície do solo e contorno do bulbo, chuvas inesperadas podem mover os sais para dentro da zona radicular. Então, as irrigações deveriam ser manejadas durante ou após as chuvas para lixiviar os sais antes que crie situação de danos às culturas.

### **8.5.3 Manejo do lençol freático (LF) raso**

A subirrigação é uma prática comum de manejo do lençol freático em zonas úmidas. Em zonas áridas e semi-áridas, o manejo da água subterrânea historicamente tem sido passivo e quase sempre uma parte adicional dos projetos de irrigação, que é o sistema de drenagem, tendo ação apenas de controle do LF. Atualmente, entretanto, o manejo da água subterrânea em regiões semi-áridas tem sido considerado como um meio para usar água mais efetivamente, porque novos conhecimentos indicam que a produção das culturas pode ser mantida com água de salinidade mais alta do que previamente se pensava (Rhoades *et al.*, 1992). Problemas com a falta de água tem intensificado a necessidade de minimizar o volume de água drenado, e outras demandas de água tem forçado a agricultura maximizar o uso de água disponível. A salinidade do solo e da água subterrânea e de irrigação influenciam o próprio manejo do lençol freático raso (Kruse *et al.*, 1990).

O movimento de sais dentro da zona radicular induzido pela irrigação e o transporte destes sais pelo movimento ascendente da água do lençol freático raso resultam em um padrão de salinidade, que aumenta com a profundidade para um valor igual à salinidade da água subterrânea antes da irrigação (Figura 8.18) e há um crescimento ao longo de todo perfil, durante o período de cultivo. O aumento da concentração total de sais é uma função da água extraída da água subterrânea, lixiviação efetiva durante irrigação e sais adicionados pela água de irrigação. Um perfil de salinidade antes do período de cultivo pode ser restabelecido pela lixiviação durante o próximo período. Sem lixiviação, os sais se acumulam no perfil até que as plantas não possam mais crescer. Chuva e irrigação de pré-plantio podem lixiviar áreas onde drenos estão instalados.

A profundidade do lençol freático, a qualidade da água subterrânea e a tolerância das culturas à salinidade determinam a quantidade disponível de água do LF para a cultura. Por exemplo, uma cultura sensível à salinidade cultivada numa área cujo LF está a 1,0 m de profundidade, com  $CE = 8$  dS/m, provavelmente extrairia pouca água subterrânea e poderia sofrer pela subirrigação oriunda da ascensão capilar, devido a evaporação da água na superfície. Quanto mais a profundidade das raízes e tolerância da planta à salinidade se equiparam a profundidade e salinidade da água subterrânea, provavelmente, mais água subterrânea as plantas extraem. Grimes & Henderson (1984) encontraram que a contribuição direta máxima da água subterrânea para a necessidade hídrica da cultura foi função da qualidade e profundidade da água subterrânea. Eles atribuíram a redução dos

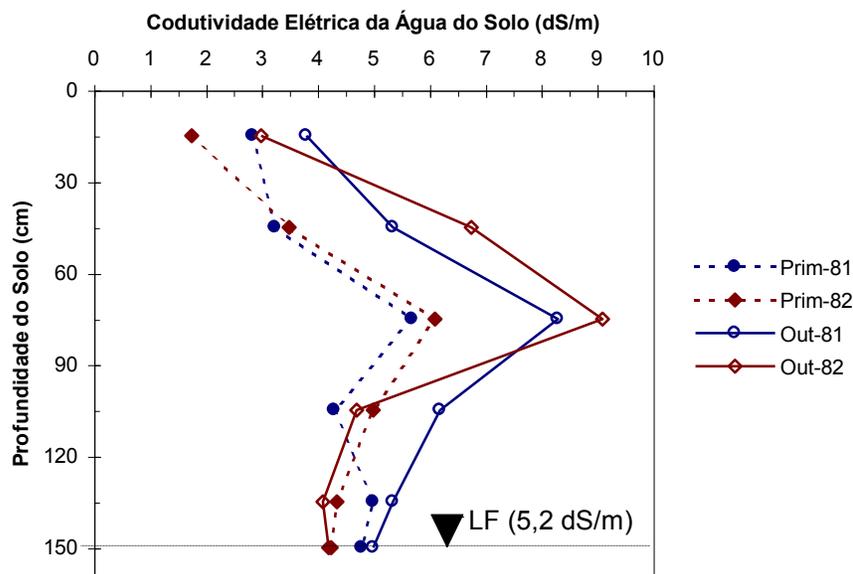


Figura 8.18 Mudanças no perfil de salinidade do solo entre duas estações de dois anos consecutivos, resultante da irrigação na presença do lençol freático (adaptado de Grimes & Henderson, 1984).

rendimentos, devido o LF raso, à aeração limitada e volumes de raízes restritos, enquanto as reduções sob LF profundo foram devido à ascensão capilar limitada da água para as raízes.

A mudança na salinidade do perfil causado pelo consumo de água subterrânea pela cultura, pode ser estimada por uma expressão particular se a salinidade média inicial do solo e a salinidade da água de irrigação e da água subterrânea são conhecidas. Conhecendo-se a necessidade hídrica das culturas e fazendo uma proporção do consumo de água entre a água de irrigação e do LF, a salinidade média final do perfil de solo pode ser estimada por:

$$\overline{CE}_F = \frac{\overline{CE}_I \cdot W_{cc_i} + CE_a \cdot D_a + CE_{lf} \cdot D_{lf}}{W_{cc_f}} \quad (8.25)$$

onde  $\overline{C}_I$  e  $\overline{C}_F$  representam a CE média final e inicial da solução do solo, respectivamente,  $W_{cc_i}$  e  $W_{cc_f}$  são as lâminas inicial e final de água armazenada no perfil à capacidade de campo,  $CE_a$  e  $CE_{lf}$  correspondem as CE's da água de irrigação e subterrânea; e  $D_a$  e  $D_{lf}$ , as respectivas lâminas de irrigação e do lençol freático consumidas. É considerado que não há lixiviação, precipitações ou dissolução de sais e a relação entre a concentração e CE é aproximadamente linear. Um cálculo simples para um perfil de 1,2 m de profundidade com umidade de saturação de  $0,55 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  ( $W_{cc}=330 \text{ mm}$ ),  $\overline{CE}_I = 7,0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $CE_a = 0,2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $CE_{lf} = 8,0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $D_a = 397 \text{ mm}$  e  $D_{lf} = 174 \text{ mm}$  produz uma salinidade final,  $\overline{CE}_F = 11,4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$  (embora a média durante o período de crescimento (cultivo) seja de  $9,2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

Se água subterrânea supre parte de necessidade hídrica da cultura, a concentração da água aplicada é determinada em base de volume ponderado. É assumido que a NL pode ser

estimada por  $NL = \frac{CE'_a}{CE_r^*}$ , onde  $CE'_a$  é a CE ponderada das águas consumidas pela cultura,

incluindo as de irrigação e subterrânea e  $CE_r^*$  é o valor máximo de salinidade do solo tolerado pela cultura, a qual corresponde ao dobro dos valores da salinidade limiar, expressos em  $CE_{es}$ , encontrados em tabelas de tolerância das culturas à salinidade. No exemplo acima,  $CE'_a = (CE_a \cdot D_a + CE_{if} \cdot D_{if}) / (D_a + D_{if}) = 2,6 \text{ dS/m}$ . Se o  $CE_r^*$  for  $7,0 \text{ dS.m}^{-1}$ ,  $NL = 2,6/7 = 0,37$ . Quanto mais salina é a água subterrânea, mais rapidamente ocorre a salinização do solo, se quantidades significativas de água subterrânea é consumida. Se existem chuva e faz-se irrigação de pré-plantio, então a concentração ponderada com volumes destas águas diminui e a NL reduz-se.

## 8.6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Avaliar a qualidade da água de irrigação, baseado nas condições de manejo, sabendo-se que vai ser utilizada para irrigar tomate com sistema de irrigação por gotejamento, que tem uma eficiência de aplicação de 90% ( $FL = 0,10$ ). A composição da água é a seguinte:  $Cl = 13,3$ ;  $SO_4 = 1,0$ ;  $HCO_3 = 6,0$ ;  $Ca = 5,3$ ;  $Mg = 5,0$  e  $Na = 10,0 \text{ mmol.c.l}^{-1}$ ,  $CE = 2,0 \text{ dS.m}^{-1}$  e  $pH = 7,7$ . O solo é um Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico latossólico com boa drenagem. A área irrigada se localiza em Mossoró-RN, cuja precipitação pluviométrica média é de 700 mm, com uma precipitação efetiva de 450 mm.

O padrão de absorção radicular, assumindo quatro camadas, será 60-30-7-3%, que é típico para irrigação de alta frequência, e a pressão parcial de  $CO_2$  nas interfaces de cada camada são: 0,07; 0,5; 1,5; 2,3 e 3 kPa..

O tomateiro tolera a uma salinidade de  $2,5 \text{ dS.m}^{-1}$  e a partir daí há uma redução no rendimento da ordem de 9,8% por unidade de salinidade do solo ( $CE_{es}$ ).

### Pede-se:

- a) Aplicar a versão não computacional do “Watsuit” para realizar esta avaliação para condições de equilíbrio
  - a.1- Estimar o perfil de salinidade sem considerar precipitação de sais.
  - a.2- Estimar a composição da solução do solo, assumindo precipitação da calcita.
- b) Analisar os resultados com respeito à cultura, ao solo e às condições de manejo que estão sendo adotadas com as diferentes metodologias discutidas no capítulo.
- c) Propor alternativas para se ter uma produção adequada.

### Solução

**a.1) Previsão do perfil de salinidade para as condições de equilíbrio, sem considerar precipitação de sais**

- Os cálculos de balanço de sais serão feitos por camada, conforme procedimento mostrado para elaboração da Tabela 8.1.

A lâmina de irrigação necessária para suprir a demanda hídrica da cultura e a fração de lixiviação será:

$$I = (E - P) \frac{1}{1 - FL} = (E - P) \cdot \frac{1}{0,9} = 1,1111(E - P)$$

A lâmina percolada abaixo da zona radicular para a FL proposta será:

$$R = (E - P) \frac{FL}{FL - 1} = 0,1111(E - P)$$

Camada	$\frac{I}{(E-P)}$	Absorção <sup>1</sup>	$\frac{R^*}{(E-P)}$	CE <sub>a</sub>	CE <sub>r</sub> <sup>2</sup>	$\overline{CE}_{cc}$	$\overline{CE}_{es}$
1	1,1111	0,6(E-P)	0,5111	2,000	4,348	3,174	1,587
2	0,5111	0,3(E-P)	0,2111	4,348	10,527	7,348	3,674
3	0,2111	0,07(E-P)	0,1411	10,527	15,749	13,138	6,569
4	0,1411	0,03(E-P)	0,1111	15,749	20,00	17,874	8,937
Média aritmética							5,20
Média ponderada com a absorção							2,78

<sup>1</sup> (E-P) representa a quantidade da água de irrigação líquida consumida pela cultura.

<sup>2</sup> Assume-se que a CE da água percolada é igual a CE da solução do solo à capacidade de campo.

Se tivesse assumido o padrão de absorção normal, os valores médios seriam  $\overline{CE}_{es} = 2,70$  e  $\overline{CE}_{es} = 3,76$  dS.m<sup>-1</sup>, ou seja, a média ponderada continuaria praticamente a mesma, enquanto a média aritmética diminuiria em 27,7 %.

#### a.2) Assumindo a precipitação do Ca

Como na água de irrigação é de apenas 1 mmol<sub>c</sub>.l<sup>-1</sup> de sulfato e o maior fator de concentração da água no solo é 10, o sulfato irá se concentrar até 10 mmol<sub>c</sub>.l<sup>-1</sup>, valor abaixo da solubilidade do sulfato de cálcio. Assim a ocorrência de precipitados deve ocorrer apenas como carbonato de cálcio.

Os quadros seguintes apresentam os resultados para cada posição da zona radicular.

Prof. Z.R. em Quartos	Ce <sub>r</sub>	Fc	Na	Mg	Ca	Cl	HCO <sub>3</sub>	RAS
0	2,00	1,00	10,6	5,0	5,3	13,3	6,0	4,67
1	4,35	2,17	23,0	10,9	11,5	28,9	13,0	6,89
2	10,53	5,26	55,8	26,3	27,9	70,0	31,6	10,72
3	15,75	7,87	83,5	39,4	41,7	104,7	47,2	13,11
4	20,00	10,00	106,0	50,0	53,0	133,3	60,0	14,77
Média <sup>1</sup>						69,2	10,11	
Média ponderada com a absorção						37,2	7,36	

Prof. Z.R. em Quartos	P(CO <sub>2</sub> ) (kPa)	HCO <sub>3</sub> /Ca	X	Ca <sub>e</sub>	RAS <sub>aj</sub>	CE <sub>as</sub> )	CE <sub>esaj</sub>
0	0,07	1,13	11,56	2,1	5,65	1,68	0,84
1	0,50	1,13	12,79	4,4	8,35	3,63	1,82
2	1,50	1,13	14,66	7,2	13,63	8,46	4,23
3	2,30	1,13	15,65	8,9	16,99	12,46	6,23
4	3,00	1,13	16,27	10,1	19,34	15,71	7,85
Média <sup>1</sup>					12,87	8,31	4,16
Média ponderada com a absorção					9,11	4,56	2,28

<sup>1</sup> Valor calculado fazendo-se a média de cada camada e posterior média das médias parciais.

O procedimento de como calcular os valores apresentados nestes dois últimos quadros estão apresentados em seguida:

$CE_r$  - CE da água percolada das respectivas camadas, conforme o quadro feito para não ocorrência de precipitações. O valor para a posição "0" corresponde a CE da água de irrigação.

$F_c$  - fator de concentração da solução do solo, obtido pela razão entre  $CE_r$  de cada posição da zona radicular e  $CE_a$ .

Na, Mg, Ca,  $HCO_3$  e Cl - concentração dos elementos contidos na água de irrigação vezes o fator de concentração de cada posição.

RAS - relação de adsorção de sódio, calculado para cada posição: 
$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Mg + Ca}{2}}}$$

X - concentração molar de cálcio dissolvido ou precipitado na solução do solo para alcançar o equilíbrio com a calcita, em  $mmol\ell^{-1}$ , que pode ser estimado por:

$$X = (9,32 + 2,47CE^{1/2} - 0,136CE) \left( \frac{HCO_3}{Ca} \right)^{-2/3} \quad (r^2 = 0,999)$$

Esta equação foi desenvolvida a partir de um ajustamento matemático dos valores da tabela apresentada por Suarez (1981), adaptando-a às grandezas e unidades.

$Ca_e$  - concentração de cálcio em equilíbrio na solução do solo, em  $mmol_c\ell^{-1}$ , obtido por:

$$Ca_e = 0,43 \cdot X \cdot (P_{(CO_2)})^{1/3}$$

Alternativamente, pode-se usar as Figuras 8.15 e 8.16.

$RAS_{aj}$  - RAS da solução do solo ajustada para o cálcio em equilíbrio com a calcita. Nesse caso, substitui o Ca por  $Ca_e$  na equação de RAS.

$CE_{as}$  - CE da solução do solo, corrigida pela precipitação ou dissolução da calcita, ou seja,  $CE_{as} = CE_r - 0,1 \cdot (Ca - Ca_e)$ .

$CE_{esaj}$  - CE da solução do solo ( $CE_{as}$ ) expressa como do extrato de saturação, assumindo como a metade do valor da  $CE_{as}$ .

Assim,  $\overline{CE_{es}}$  e  $\overline{CE_{es}}$ , assumindo a precipitação do  $CaCO_3$ , foram respectivamente 2,28 e 4,16  $dS\ m^{-1}$ , representando uma redução de 20,0 e 18,0% em relação aos valores obtidos sem considerar as precipitações. Por outro lado, a média aritmética e ponderada da RAS apresentaram um aumento de 27,3 e 23,8%, quando se efetuou a correção da precipitação do Ca.

### **b.1) Outras estimativas da salinidade do solo para as condições de equilíbrio dinâmico**

- Usando a Equação 8.16 para determinar a salinidade média resultante da irrigação, assumindo a profundidade da zona radicular com 0,60 m:

$$\frac{\overline{CE}}{2,0} = \frac{1}{0,1} + \frac{0,2 \cdot 0,6}{0,6 \cdot 0,1} + \ln \left[ 0,1 + (1 + 0,1) \cdot e^{-\frac{0,6}{0,2 \cdot 0,6}} \right] \Rightarrow \overline{CE}_{es} = 4,88 dS m^{-1}$$

- Aplicando a Equação 8.17 para estimar a salinidade média ponderada para as condições de equilíbrio, temos:

$$\overline{\overline{CE}} = \frac{2,0}{1 - 0,1} \ln \frac{1}{0,1} = 5,12 \Rightarrow \overline{\overline{CE}}_{es} = 2,56 dS m^{-1}$$

- **Conclusões:** Verifica-se que para irrigação localizada (alta frequência), os valores de salinidade estimados (2,78, 2,28 ou 2,56 dS m<sup>-1</sup>) aproximam-se de 2,5, que é salinidade limiar do tomateiro. Mesmo assumido o padrão de absorção normal (Rhoades, 1992), o valor também é praticamente o mesmo (2,70 dS m<sup>-1</sup>). Logo o tomateiro poderia ser cultivada sem problemas. Como o solo tem boa drenagem, um manejo apropriado da irrigação no período de chuva, permite uma dessalinização do solo, e devido os 450 mm de chuva efetiva, a mesma poderá ser usada como maior parte da lâmina de lixiviação, reduzindo a lâmina total de irrigação.

**b.2) Estimativa da necessidade de lixiviação (NL), sabendo que o tomateiro tolera uma salinidade de 2,5 dS m<sup>-1</sup>**

Metodologia	Fc*	NL
Equação 19	1,25	0,19
Figura 11	1,25	0,15
Figura 8.12 - Irrigação Convencional	1,25	0,21
Figura 8.12 - Irrigação de Alta Frequência	1,25	0,09

Verifica-se que para irrigação de alta frequência, a FL adotada será suficiente para o tomateiro irrigado por gotejamento.

Para sistemas de irrigação convencional, como por sulco, precisaria aplicar uma lâmina de lixiviação entre 0,15 e 0,20, ou seja, 17 a 25% de lâmina a mais do que a evapotranspiração da cultura. Considerando que durante o ano a evapotranspiração do tomateiro fosse de 1200 mm, a precipitação efetiva corresponderia a 0,375, ou seja, não seria necessária aplicar irrigação para promover lixiviação, apenas para suprir o uso consuntivo da cultura. Entretanto, como as chuvas ocorrem durante 2 a 3 meses do ano, pode haver acumulação excessiva de sais na zona radicular na época seca, precisando, neste caso, de lâminas de irrigação adicional em determinadas épocas. O momento dessas lixiviações podem ser estabelecidas através de simulações de balanço de sais por mês (van Hoorn & van Alphen, 1994), ou através do monitoramento periódico da salinidade do solo.

### **b.3) Efeitos do Na no solo e toxidades**

A RAS média da solução do solo, mesmo considerando o cálcio precipitado, ficou abaixo de 15%, ou seja, que o solo não se tornará sódico, podendo trazer problemas de toxicidade de sódio apenas para culturas sensíveis.

Analisando a questão com respeito a problemas de infiltração, entrando com os valores de RAS<sup>o</sup> (5,65) e CE<sub>a</sub> (2,0) nas Figuras 8.13 e 8.14, verifica-se que não há risco de

redução de infiltração, exceto no caso de água de chuva, que requer, por exemplo, cobertura vegetal do solo para evitar encrostamento.

Com respeito ao cloreto, as concentrações médias aritmética e ponderada são 69,2 e 37,2  $\text{mmol}_c\cdot\text{l}^{-1}$ , de modo que culturas sensíveis poderão apresentar problemas de toxidez. No caso do tomateiro, não seria problema, necessitando apenas de uma adequação da adubação.

### c) *Outras alternativas*

Para se ter uma produção adequada, teria que selecionar culturas que tolerem salinidade de pelo menos 2,5  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , através da irrigação por gotejamento. Caso queira cultivar, por exemplo, cenoura, cebola e pimentão ( $SL=1,0, 1,2$  e  $1,5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ), seria necessário aumentar a fração de lixiviação (0,27, 0,25 e 0,23, segundo a Figura 8.11), ou seja, aumentaria entre 15 e 20 % o consumo de água de irrigação para incrementar a lixiviação de sais. Devido a relação entre a SL e a CEa estar abaixo de 0,75, a Figura 8.12 não é adequada para estimar a NL para irrigação de alta frequência. Outra alternativa apresentada no texto é usar a Equação 8.17, onde adota-se valores de FL por tentativa até o valor de  $\overline{CE}_{es}$  se aproximar com S.L.

Para irrigação por sulco, a cultura teria que tolerar uma salinidade entre 4 e 5  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ , conforme mostram os dados apresentados nos quadros para irrigação convencional.

## 8.7. CONCLUSÕES

A demanda crescente de alimentos no mundo tem exigido o aumento da produção agrícola, que antes se dava pelo incremento da área plantada e, atualmente, pelo crescimento da produtividade das áreas cultivadas. Este crescimento normalmente está associado ao incremento da irrigação, aumentando a utilização de água de qualidade inferior. Como consequência, tem sido comum o surgimento de problemas relacionados com a salinidade prejudicando o rendimento das culturas. Entretanto, sabe-se que o problema ocorre principalmente nas regiões áridas e semi-áridas (55% do mundo), onde a drenagem do solo não é adequada e o manejo do sistema solo-água-planta não é adaptado para as condições locais. Então, dando-se condições apropriadas de drenagem para a área irrigada, selecionando-se culturas tolerantes para os níveis de salinidade previstos para o solo, que é função da salinidade da água de irrigação, quantidade de chuva e fração de lixiviação, associados às práticas culturais e de manejo dos sistemas de irrigação, é possível ter uma agricultura sustentável e bastante produtiva, mesmo na presença de salinidade.

No entanto, devido as metodologias recomendadas para simular a salinidade do solo para as condições de equilíbrio divergirem nos resultados finais, recomenda-se estabelecer aquela que seja melhor para a situação em questão, e que a pesquisa e experiência demonstre como mais precisa. No Brasil, poucos trabalhos tem sido desenvolvidos com este intuito.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AYERS, A.D.; WADLEIGH, C.H. & MAGISTAD, D.C. The interrelationship of salt concentration and soil moisture content with growth of beans. **Agron. J.**, v.35, p.796-810, 1943.
- AYERS, R.S. & WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Trad. de H.R. Gheyi, J.F. de Medeiros e F.A.V. Damasceno. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p. (FAO. Estudos de Irrigação e Drenagem, 29 revisado1).
- BERNSTEIN, L. & FRANCOIS, L.E. Leaching requirement studies: Sensitivity of alfalfa to salinity of irrigation and drainage waters. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, v.37, p.931-943, 1973.
- BERNSTEIN, L. & FRANCOIS, L. E. Effect of frequency of sprinkling with saline waters compared with daily drip irrigation. **Agron. J.**, v.67, p.85-190, 1975.
- BERNSTEIN, L. & PEARSON, G.A. Influence of integrated moisture stress achieved by varying the osmotic pressure of culture solutions on growth of tomato and pepper plantas. **Soil Sci.**, v.77, p.355-368, 1954.
- BOWER, C.A.; OGATA, G. & TUCKER, J.M. Rootzone salt profiles and alfalfa growth as influenced by irrigation water quality. **Agron. J.**, v.61, p.783-785, 1969.
- BRESLER, E. Application of a conceptual model to irrigation water requirement and salt tolerance of crops. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.51, p.788-793, 1987.
- BRESLER, E. & HOFFMAN, G.J. Irrigation management for salinity control: Theories and tests. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.50, p.1552-1560, 1986.
- FRANCOIS, L.E. Alfalfa management under saline conditions with zero leaching. **Agron. J.**, v.73, p.1042-1046, 1981.
- GRIMES, D.W. & HENDERSON, D.W. **Developing the resource potential of a shallow water table**. Completion Report on OWRT Project B-216-Cal, to the California Water Resources Center, Univ. Calif. at Davis, 1985. 63 p.
- HELLER, J.; SHALHEVET, J. & GOEL, A. Response of a citrus orchard to soil moisture and soil salinity Berlin: Springer-Verlag, 1973. v.4, p.409-419.
- HOFFMAN, G.J. Alleviating salinity stress. In: ARKIN, G.F. & TAYLOR, H.M. (eds.) **Modifying the root environment to reduce crop stress**. St. Joseph, Michigan: ASAE, 1981. cap.9, p.305-343. (ASAE Monograph, 4).
- HOFFMAN, G.J.; JOBES, J.A. & ALVES, W.J. Response of tall fescue to irrigation water salinity, leaching fraction and irrigation frequency. **Agric. Water Manag.**, v.7, p.439-456, 1983.
- HOFFMAN, G.J.; RHOADES, J.D.; LETEY, J & SHENG, F. Salinity management. In: HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A. & SOLOMON, K.H. (eds.) **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: MI: ASAE/Pamela De-Vore-Hansen, 1992. cap.18, p.667-715, 1992. (ASAE Monograph, 9)

- HOFFMAN, G.J. & van GENUCHTEN, M.Th. Soil properties and efficient water use. In: Taylor, H.M.; Jordan, W & Sinclair, T. (eds). **Water management for salinity control**. Limitations to efficient water use in crop production. Madison, WI: Amer. Soc. Agron, 1983. p.73-85.
- INGVALSON, R.D.; RHOADES, J.D. & PAGE, A.L. Correlation of alfalfa yield with various index of salinity. **Soil Science**, v.122, n.3, p.145-153, 1976.
- JURINAK, J.J. & SUAREZ D.L. The chemistry of salt-affected soils and waters. In: K.K. Tanji (ed.). **Agricultural salinity assessment and management manual**. New York: ASCE,. 1990. cap. 3, p.42-63.
- KRUSE, E.G.; WILLARDSON, L.& AYARS, J. On-form irrigation and drainage practices. In: TANJI, K.K. **Agricultural salinity assessment and management**. New York: ASCE, 1990. cap.16, p.349-391.
- LETEY, J. & DINAR, A. Simulated crop-water production functions for several crops when irrigated with saline waters. **Hilgardia**, v.54, n.1, p.1-32, 1986.
- LETEY, J.; KNAPP, K.C & SOLOMON, K. Crop production functions. In: TANJI, K.K. (ed.) **Agricultural salinity assessment and management manual**. New York: ASCE, 1990. cap. 14, p.305-326.
- MEIRI, A. Plant response to salinity: Experimental methodology and application to field. In: Shainberg, I & Shalhevet, K (eds.). **Soil Salinity under Irrigation**. New York: Springer/Verlag, 1984. p.284-297.
- MEIRI, A. & PLAUT Z. Crop production and management under saline conditions. **Plant and Soil**, v.89, n.1/3, p.253-271, 1985.
- MEIRI, A. & POLJAKOFF-MAYBER, A.. Effect of various salinity regimes on growth, leaf expansion, and transpiration rate of bean plants. **Soil Sci.**, v.109, p.26-34, 1970.
- MEIRI, A. & SHALHEVET, J. Pepper plant response to irrigation water quality and timing of leaching. New York: Springer/Verlag, 1973. p.284-297. (Ecological Studies, 4).
- RAATS, P.A.C. Steady flows of water and salt in uniform soil profiles with plant roots. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, v.38, p.717-722, 1974.
- RHOADES, J. D. Quality of water for irrigation. **Soil Science**, v.113, p.277-284, 1972.
- RHOADES, J.D. Drainage for salinity control. In: van SCHILFGAARDE, J. (ed.). **Drainage and Agriculture**. Madison,WI: American Society of Agronomy, 1974. cap.15, p. 433-461. 1974. (A.S.A. Agronomy, 17)
- RHOADES, J.D. Potential for using saline agricultural drainage waters for irrigation. In: PROC. WATER MANAGEMENT FOR IRRIGATION AND DRAINAGE, Reno, Nevada: ASCE, 1977. p.95-116.
- RHOADES, J.D. Reclamation and management of salt-affected soils after drainage. PROC. FIRST ANNUAL WESTERN PROVINCIAL CONF. RATIONALIZATION OF WATER AND SOIL RESOURCES AND MANAGEMENT. Lethbridge, Alberta, Canada, 1982. p.123-197.

- RHOADES, J.D.; KANDIAH, A & MASHALI, A.M. **The use of saline waters for crop production**. Rome: FAO, 1992. 133p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 48).
- RHOADES, J.D & LOVEDAY, J. Salinity in irrigated agriculture. In: STEWART, D. R. & NIELSEN, D. R. (eds.) **Irrigation of agricultural crops**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1990. p.1089-1142.
- RHOADES, J. D & MERRILL, S. D. Assessing the suitability of water for irrigation: Theoretical and empirical approaches. In: PROGNOSIS OF SALINITY AND ALKALINITY. Rome: FAO, 1976. p.69-110. (FAO. Soils Bulletin, 31).
- RICHARDS, L.A. (ed.) **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Salinity Laboratory, 1954. 160p. (USDA. Agriculture Handbook, 60).
- SCALOPPI, E.D. & BRITO, R.A.L. Qualidade da água e do solo para irrigação. **Informe Agropecuário**, v.139, n.12, p.80-94, 1986.
- SHALHEVET, J. & BERNSTEIN, L.. Effects of vertically heterogeneous soil salinity on plant growth and water uptake. **Soil Sci.**, v.106, p.85-93, 1968.
- SHALHEVET, J.; HEUER, B. & MEIRI, A. Irrigation interval as a factor in the tolerance to salinity of eggplant. **Irrig. Sci.**, v.4, p.83-93, 1983.
- SHALHEVET, J., VINTEN, A. & MEIRI, A. Irrigation interval as a factor in sweet corn response to salinity. **Agron. J.**, v.78 p.539-545, 1986.
- SHALHEVET, J. & YARON B. Effect of soil and water salinity on tomato quality. **Plant and Soil**, v.39, p.285-292, 1973.
- SMITH, R.J. & HANCOCK, N.H. Leaching requirement of irrigated soil. **Agric. Water Manag.**, v.11, p. 13-22, 1986.
- SUAREZ, D.L. Relationship between  $pH_c$  and SAR and an alternative method of estimating SAR of soil or drainage water. **Soil Sci. Am. J.**, v.45, p.469-475, 1981.
- SUAREZ, D.L. Graphical calculation of ion concentrations in calcium carbonate and/or gypsum soil solutions. **J. Environ. Qual.**, v.11, p.302-308, 1982.
- van HOORN, J. W. & van ALPHEN, J. G. Salinity control. In: RITZEMA, H.P. (ed.). 2.ed. **Drainage Principles and Applications**. Wageningen, The Netherlands: ILRI, 1994. cap. 15, p.533-600. (ILRI Publication, 16).
- van SCHILFGAARDE, J.; BERNSTEIN, L.; RHOADES, J.D. & RAWLINS, S.L. Irrigation management for salt control. **J. Irrig. Drain. Div. ASCE**, v.100, p.321-335, 1974.
- WADLEIGH, C.H. & AYERS, A.D. Growth and biochemical composition of bean plants as conditioned by soil moisture tension and salt concentrations. **Plant Physiol.**, v.20, p.106-132, 1945.
- WADLEIGH, C.H.; GAUCH, H.G. & MAGISTARD, O.C. **Growth and rubber accumulation in guayule**. U.S. Dept. of Agric., 1946. (Tech. Bull. N<sup>o</sup> 1946).

WAGENET, R.J.; CAMPBELL, W.P.; BAMATRAFF, A. M. & TURNER, D.L. Salinity, irrigation frequency, and fertilization effect on barley growth. **Agron. J.**, v.72, p.969-974, 1980.