

10 RECUPERAÇÃO DE SOLOS AFETADOS POR SAIS

Rivaldo Vital dos Santos e Fernando F. Ferreyra Hernandez

10.1 INTRODUÇÃO

Os solos afetados por sais ocorrem em importantes extensões no mundo, principalmente em regiões áridas e semi-áridas, onde a irrigação é necessária para uma agricultura bem sucedida. A elevação do conteúdo de sais solúveis no solo influencia no comportamento das culturas de diversas maneiras, através de mudanças nas proporções de sódio trocável, na reação dos solos, nas propriedades físicas dos solos, no potencial osmótico da solução do solo e nos efeitos tóxicos de íons específicos. Estas mudanças influenciam na atividade das raízes das plantas e dos microorganismos do solo, conseqüentemente, na produtividade das culturas.

O manejo adequado dos solos afetados por sais é essencial para uma agricultura irrigada eficiente e sustentável. Compreende a recuperação de solos afetados por sais, geralmente causada por uma irrigação inadequada e a manutenção ou prevenção dos solos irrigados não afetados e os recuperados. Envolve as aplicações das teorias e conhecimentos existentes da física e química do solo, como também das relações irrigação-salinidade e produção-salinidade.

Na recuperação e manejo dos solos afetados, o fator chave é o movimento da água através do perfil do solo. A taxa de infiltração (q) e a condutividade hidráulica do solo (K) diminuem com a diminuição da salinidade do solo e com o aumento do sódio trocável. Isto, em parte, é devido ao impacto mecânico e ação dispersante da água aplicada e deposição das partículas liberadas do solo na superfície. No entanto, através de várias combinações de cultivos, uso de corretivos do solo e práticas de lavras podem ser mantidas a q e K em valores adequados. Por outro lado, no processo de recuperação de solos afetados, para que a lavagem dos sais seja efetiva, as condições de drenagem dos solos devem ser adequadas de maneira que os sais solúveis, sódio trocável e ou boro possam ser removidos da zona radicular.

10.2 PRÁTICAS DE MANEJO USADAS NA RECUPERAÇÃO

Na recuperação de solos afetados por sais, são empregadas diversas práticas relativas ao manejo do solo, da água e da cultura. Entre elas, duas são consideradas fundamentais: a lavagem dos sais e a aplicação de melhoradores químicos, por atuarem diretamente na eliminação ou correção dos problemas desses solos, para com as plantas. As demais práticas ou técnicas utilizadas (aração, subsolagem, aplicação de resíduos orgânicos, etc.) são consideradas auxiliares por agirem indiretamente sobre algumas propriedades do solo, que facilitam a recuperação. No processo de recuperação, comumente são utilizadas várias dessas técnicas de forma simultânea ou sucessiva.

A seguir são relacionadas algumas práticas que podem ser utilizadas na recuperação de solos afetados por sais.

10.2.1 Técnicas Fundamentais

Lavagem

Consiste na eliminação dos sais solúveis através da passagem pelo solo de certa quantidade de água que arrasta consigo os sais dissolvidos. A lavagem de sais pode-se realizar com duas finalidades: 1) reduzir a alta salinidade inicial do solo até níveis toleráveis pelas culturas, denominada **lavagem de recuperação**; 2) impedir a ressalinização de solos recuperados ou prevenir a salinização de solos irrigados não afetados, que comumente é chamada de **lavagem de manutenção** (Pizarro, 1978). Esta prática é necessária na recuperação tanto de solos salinos como de solos sódicos. Informações mais detalhadas sobre a lavagem são fornecidas nos itens de recuperação desses solos.

Melhoramento químico

O emprego de melhoradores ou corretivos químicos se faz necessário nos solos sódicos, nos quais, sua capacidade de transmissão de água é fortemente afetada pelos teores elevados de sódio trocável. O uso de corretivos tem como finalidade fornecer cálcio ou liberá-lo, quando presente no solo, para substituir o sódio trocável do solo. São várias as opções existentes para a seleção do corretivo adequado, assim como, para sua aplicação no solo, as quais são detalhadas no item 10.5.

10.2.2 Técnicas auxiliares

Drenagem

A drenagem do solo é um fator crítico para que a lixiviação dos solos seja efetiva. A drenagem inadequada, natural ou construída artificialmente, pode inviabilizar a lavagem, que, contrariamente, pode resultar numa elevação do lençol freático e conseqüentemente aumentar a salinização do solo e reduzir a aeração (Shalhevet, 1994). Diversas observações de campo realizadas na Índia, Paquistão e nos Estados Unidos indicam que para prevenir os efeitos adversos sobre os rendimentos nas culturas de sorgo, milho, algodão, repolho e outras, é necessário que a profundidade do lençol freático esteja entre 0,6 e 1,0 m (Doering *et. al.*, 1982, Gupta & Khosla, 1982). O principal critério para estabelecer a profundidade adequada do lençol freático é manter a zona radicular bem arejada; geralmente, para mantê-la a 1,0m, recomenda-se a instalação do sistema de drenagem entre 1,0 e 1,5 m (Shalhevet, 1994). No entanto, algumas evidências sugerem que a localização dos drenos a profundidades maiores que 1,1 - 1,5 m, pode drenar os aquíferos mais do que o necessário (Van schifgaarde, 1984). Nos solos aluviais do Nordeste, onde situa-se a maioria dos projetos de irrigação, a instalação dos drenos subterrâneos é limitada pelo pequeno desnível existente entre a superfície natural do terreno e seu desaguadouro (rio).

Sistematização e nivelamento

A uniformidade de distribuição da água de irrigação favorece a lixiviação dos sais no solo. Assim, a sistematização e nivelamento constituem práticas necessárias para uma boa distribuição da água, principalmente quando as lavagens são realizadas por inundação,

enquanto que em sistemas de irrigação por aspersão e localizada, a utilização destas práticas é menos crítica. A sistematização compreende cortes e aterros, transportando-se o solo das partes altas para as mais baixas do campo, com o objetivo de modificar e uniformizar as declividades. No nivelamento, a superfície do terreno é aplainada sem produzir mudanças de declividade. O nivelamento comumente se realiza anualmente ou nos períodos de mudança de culturas anuais, enquanto, a sistematização se realiza somente uma vez, na incorporação de terras à agricultura e ou instalação de sistemas de irrigação.

Lavras superficiais

As escarificações superficiais comumente realizadas para a eliminação de ervas daninhas, também, quebram as crostas, soltam os primeiros centímetros do solo e aumentam sua rugosidade, que favorece a penetração da água, pelo retardamento de seu deslocamento e aumento do tempo de oportunidade de infiltração. Os efeitos destas práticas são de curta duração, mantendo-se durante uma ou duas irrigações, após as quais pode ser necessário repeti-las.

Aração profunda

Prática freqüente que se realiza antes da implantação das culturas e no caso de culturas perenes durante os períodos de repouso das mesmas, quando causam menos danos as raízes. A ruptura do solo e a formação de torrões favorece a penetração da água durante uma ou duas irrigações, diminuindo a salinidade na zona de semeadura, o que pode melhorar a germinação e desenvolvimento inicial das culturas, período em que geralmente são mais sensíveis a salinidade.

Subsolagem

É uma operação que tem como objetivo quebrar camadas de solo impermeáveis sem inverter as camadas, e reduz ou elimina os efeitos nocivos de camadas compactadas e adensadas que se encontram a mais de 30 cm de profundidade, aumentando a permeabilidade do solo. Seu efeito é temporário, permanecendo de um a dois anos

Misturas com areia

Consiste da adição e mistura de areia a camadas de solos de textura fina com o objetivo de melhorar a permeabilidade e penetração das raízes no solo. Em consequência da melhoria das propriedades transmissoras da água, a lixiviação dos sais é facilitada. Seu emprego é limitado pelas grandes doses requeridas (700 -1000 Mg ha⁻¹).

Inversão de perfis

Consiste em enterrar o horizonte superficial, de características indesejáveis, com material proveniente de horizontes mais profundos que possuem melhores características físico-químicas.

Aplicação de resíduos orgânicos

A adição de esterco, resíduos de colheitas e resíduos industriais orgânicos no solo, favorecem a estruturação do solo e melhoram a infiltração da água. Os resíduos podem ser deixados como cobertura na superfície ou incorporados no solo. Quando aplicados na superfície (mulch), reduzem a ascensão de água e movimento de sais nos solos salinos e

facilitam a lixiviação pelas chuvas de inverno em regiões semi-áridas ou em sistemas de irrigação por aspersão (Carter & Fanning, 1964). Para que as incorporações sejam eficientes, são necessárias adições de grandes quantidades de resíduos nos primeiros 15 cm do solo (10-30 % em volume), de maneira que controlem a quantidade de água infiltrada em um tempo determinado (Ayers & Westcot, 1991). Os resíduos fibrosos de difícil decomposição (casca de arroz, palha de arroz, trigo, cevada, milho etc.) são mais eficazes que os resíduos de rápida decomposição (hortaliças, legumes etc.). Os efeitos desta prática são temporários, e requerem incorporações periódicas nos cultivos.

Cultivos de elevada evapotranspiração

Estes cultivos provocam o abaixamento do lençol freático, facilitando a lixiviação de sais, além do que, a sombra produzida pelos cultivos reduz a evaporação pela superfície do solo. Se as condições de salinidade do solo permitem podem ser usadas culturas como alfafa ou outras forrageiras, cana de açúcar, eucalipto, etc., que possibilitem algum retorno econômico.

10.3 SELEÇÃO DAS PRÁTICAS DE RECUPERAÇÃO

A seleção das práticas de manejo para recuperação de solos afetados por sais depende do diagnóstico correto da natureza e extensão do problema de salinidade, e também, de condições ambientais favoráveis, que permitam sua aplicação.

Em solos salinos e solos com alto teor de boro, a prática comum é o cultivo de plantas tolerantes, juntamente com lavras e aplicações de altas lâminas de irrigação para lavagem dos sais solúveis em excesso.

Em solos sódicos, quando a infiltração é inadequada, as opções de manejo são dirigidas para melhorar a condutividade hidráulica (K). Assim, para melhorar as propriedades físicas do solo, podem ser usadas várias combinações de práticas de lavra, uso de corretivos e práticas culturais (Oster, 1994). As lavras destroem as crostas superficiais e aumentam a penetração da água nas irrigações posteriores. Por outro lado, a aplicação de corretivos químicos pode mudar a composição química da solução do solo. Por exemplo, aplicações de gesso na superfície do solo ou na água de irrigação aumentam a condutividade elétrica (CE) e reduzem a relação de adsorção de sódio (RAS) da água que infiltra. Em solos calcáreos a aplicação de ácido sulfúrico reduz a PST na superfície do solo. A introdução de culturas durante a recuperação de solos sódicos também possibilitam a elevação da K (Robbins, 1986).

Por outro lado, além do tipo de problema do solo que necessita ser corrigido, a seleção das práticas adequadas de recuperação também depende das plantas cultivadas na área e da disponibilidade de recursos econômicos e de equipamentos para a preparação do solo. Nos países desenvolvidos, onde se dispõe de força mecânica para o preparo do solo e aplicação de outras técnicas (distribuição e incorporação de corretivos químicos, nivelamento das terras, construção de valas altas de terra, etc.) necessárias para preparar grandes áreas (60 - 250 ha), de maneira que permita a aplicação de grandes quantidades de água que após infiltrar-se, é possível a recuperação relativamente rápida dos solos afetados. Em países em desenvolvimento, onde o acesso a força mecânica é limitado, pode-se utilizar

culturas como o arroz que pode desenvolver-se em pequenas manchas sobre condições de inundação (Oster *et al.*, 1995).

Quando o agricultor não dispõe de recursos para recuperação e está disposto a esperar por vários anos para obtenção de altas produções, a recuperação pode ser efetuada, simplesmente, incluindo em seu programa de rotação de cultivos, a cultura do arroz, acompanhada de adições de grandes quantidades de resíduos orgânicos. A incorporação de casca de arroz e palha de cereais, auxilia no aumento da infiltração da água nos solos sódicos. Quando se deseja resultados rápidos, o cultivo pode ser precedido da aplicação de corretivos químicos seguidos de uma lavagem para remoção dos sais solúveis e produtos da reação do corretivo com o solo sódico (Gupta & Abroll, 1990).

10.4 RECUPERAÇÃO DE SOLOS SALINOS

O processo de recuperação de solos salinos consiste basicamente da adição ao solo de água em quantidade suficiente para lavar o excesso de sais solúveis do perfil. Compreende a dissolução dos sais presentes no solo e o transporte dos íons resultantes, através da zona radicular, em profundidade, fora da área de influência das raízes das plantas. Desta forma, é possível reduzir a alta concentração de sais da solução do solo, característica dos solos salinos, para níveis suficientemente baixos que permitam eliminar ou minimizar as reduções de produção nas culturas pelo fator salinidade.

A lavagem de recuperação normalmente requer grandes volumes de água e, quando a salinidade do solo é muito alta ($CEes > 10-15 \text{ dS m}^{-1}$), se realiza sem utilização agrícola do solo por um determinado período de tempo (semanas a meses). Quando a salinidade do solo não é muito elevada ($CEes < 10-15 \text{ dS m}^{-1}$), a lixiviação de recuperação pode ser feita com água extra, aplicada na irrigação de culturas tolerantes (Ayers & Westcot, 1991). A quantidade de água a ser usada, assim como, o tempo de recuperação de solos salinos, depende da salinidade inicial do solo, da qualidade da água de irrigação, da profundidade do solo a ser recuperada, das técnicas de irrigação utilizadas, etc. (Gupta & Abrol, 1990).

Freqüentemente, o movimento da água através do solo apresenta problemas relacionados com a textura do solo (solos argilosos), drenagem interna (camadas impermeáveis e lençóis freáticos superficiais) que dificultam a capacidade de lixiviação dos sais pelas lavagens.

10.4.1 Fundamentos da lavagem

A necessidade de lavagem pode ser explicada conceitualmente através do balanço da água e de sais na zona radicular, os quais são baseados no ciclo agrohidrológico que descreve os fluxos de água no solo que afetam direta ou indiretamente os cultivos.

O ciclo agrohidrológico de um solo irrigado, considera cinco subsistemas: a atmosfera, a superfície do solo, a água superficial, a zona radicular e a água subterrânea (Martinez, 1986). A atmosfera influencia através da demanda de evapotranspiração dos cultivos. A superfície do solo recebe a água da chuva e de irrigação, descarregando os excessos por escoamento superficial, para os cursos de água, lagos e finalmente o mar. A zona radicular, zona de absorção de água pelas culturas, recebe a água infiltrada, a água

que se eleva por capilaridade do lençol freático e descarrega por percolação profunda a água que excede sua capacidade de retenção. O lençol freático é recarregado pela água que percola do perfil do solo e por infiltrações laterais de aquíferos confinados. Na presença de drenagem natural, a água se movimenta até aflorar na superfície do solo e juntar-se a água superficial. Os diferentes fluxos de água nesses subsistemas são ilustrados esquematicamente na Figura 10.1

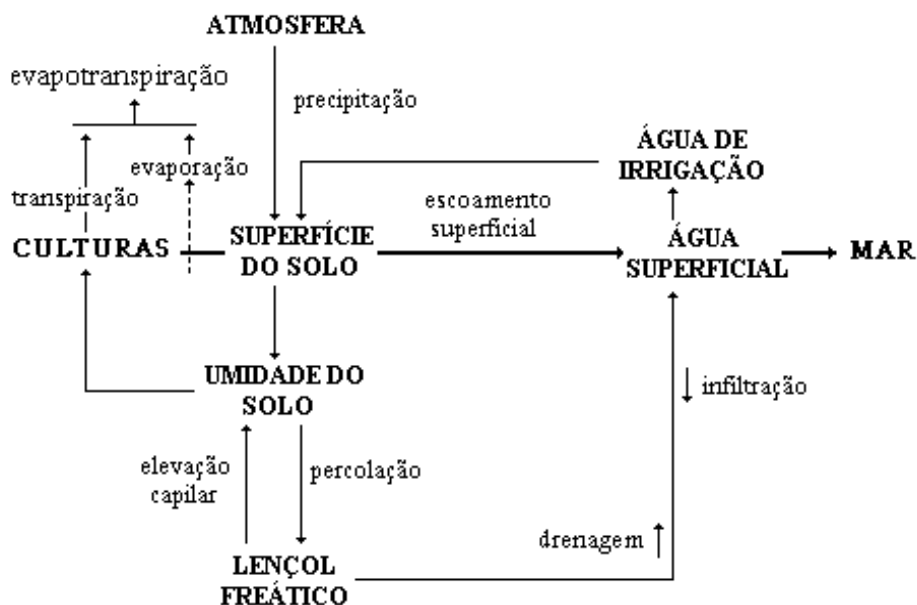


Figura 10.1 Ciclo agrohidroológico de um solo irrigado (adaptado de Martinez, 1986).

O balanço da água na zona radicular de um solo pode ser obtido pela soma algébrica das diferentes entradas e saídas de água nessa camada de solo, em um dado período de tempo, conforme representada pela Equação 10.1:

$$L_p + L_i + L_g - L_{et} - L_d = \Delta W \quad (10.1)$$

sendo,

- L_i - Quantidade efetiva de água de irrigação, descontado o escoamento superficial (mm);
- L_p - Quantidade efetiva de precipitação (mm);
- L_g - Água de elevação capilar do lençol freático (mm);
- L_{et} - Evapotranspiração pelas culturas (mm);
- L_d - Quantidade de água que percola para o lençol freático (mm);
- ΔW - Variação da quantidade de água armazenada, na zona radicular (mm).

O balanço de sais no solo é deduzido do balanço da água, multiplicando cada componente do mesmo por sua respectiva concentração de sais (**C**). Desta forma, assumindo que os sais são altamente solúveis e não precipitam, e considerando desprezíveis as adições de sais pelas águas de chuva e fertilizantes e, também, as extrações pelas culturas, o balanço de sais da zona radicular pode ser expresso pela Equação 10.2.

$$(L_i.C_i + L_g.C_g) - (L_d.C_d) = \Delta z \quad (10.2)$$

sendo,

C_i - Concentração de sais na água de irrigação ($g\ l^{-1}$);

C_g - Concentração de sais na água capilar ($g\ l^{-1}$);

C_d - Concentração de sais na água percolada ($g\ l^{-1}$);

Δz - Variação do conteúdo de sais na zona radicular ($g\ m^{-2}$).

Quando Δz é positivo, fica caracterizado um acúmulo de sais na zona radicular, originando-se um processo de salinização secundária. Contrariamente, valores negativos indicam remoção de sais da zona radicular.

Substituindo a C pela condutividade elétrica na Equação 10.2, pelo fato da CE da água, constituir um índice da concentração de sais solúveis totais dentre os limites práticos. A utilização da CE é devido a que apresenta uma relação linear com a concentração de sais em soluções relativamente diluídas, além de ser uma característica fácil de medir.

Em condições de equilíbrio (*steady state*), $\Delta z = 0$, e considerando condições ideais de aplicação e distribuição da água de irrigação no campo, assim como uma lâmina de água suficiente para prevenir o acúmulo de sais dentro da zona radicular, a Equação 10.2 se reduz a:

$$L_d/L_i = CE_i/CE_d \quad (10.3)$$

A importância deste conceito é maior que sua precisão, uma vez que tem permitido o desenvolvimento de equações simples que relacionam a necessidade de água pelas culturas e a salinidade da água de irrigação e sua extensão às necessidades de lavagem (Shainberg & oster, 1978). Assim, na Equação 10.3, para as condições estabelecidas, observa-se que a fração de lavagem ($LF = L_d/L_i$) é igual a relação entre a salinidade da água de irrigação e drenagem (CE_i/CE_d), indicando que variando a fração de lavagem, é possível o controle da salinidade da água de drenagem dentro de certos limites, e também, a salinidade da água do solo na zona radicular em níveis desejáveis, com valores intermediários entre a CE_i e CE_d .

10.4.2 Necessidade de Lavagem

A necessidade de lavagem ou lixiviação (NL) pode ser definida como a menor fração de água aplicada (irrigação mais precipitação) que é necessária drenar abaixo da zona radicular para prevenir qualquer perda na produtividade pelo acúmulo de sais solúveis em excesso (Hoffman, 1985).

Deve-se salientar que a quantidade de água necessária para prevenir a salinização dos solos irrigados (lavagem de manutenção) é diferente da quantidade necessária para a recuperação de um solo salino (lavagem de recuperação).

Necessidade de lavagem de manutenção

A estimativa da necessidade de lixiviação para um solo irrigado, pode ser realizada, estimando-se primeiro a lâmina extra de água de irrigação que deve ser aplicada para manter a concentração média de sais na solução do solo em níveis que não resultem em

reduções significativas de produção. Desta forma, a necessidade de lixiviação de manutenção (NL_m) pode ser obtida pela Equação 10.4:

$$NL_m = CE_i/CE_d^* = L_d^*/L_i \quad (10.4)$$

sendo CE_d^* a salinidade máxima permissível (fornecida em tabelas) e L_d^* a lâmina de drenagem mínima permissível, para manter altas produções.

São vários os modelos que têm sido propostos para relacionar a CE_d^* com valores da salinidade do solo que sejam indicativos da necessidade de lavagem para as culturas. Hoffman (1985), comparou as predições de NL_m , obtidas por 5 modelos, com os resultados experimentais de tolerância de várias culturas. Os modelos comparados foram os propostos por: 1) Bernstein (1964), que assume que CE_d^* é igual a CE do extrato de saturação do solo para reduções de produção de 50% (CE_{es50}); 2) Van Shilfgaarde *et al.* (1974), que consideram que na capacidade de campo o conteúdo de água é a metade do conteúdo na amostra de solo saturada, sendo a CE_d^* o dobro da CE_{es} obtida pela extrapolação dos dados de tolerância para 0% de produção (CE_{es0}); 3) Rhoades (1974), que assume que a $CE_d^* = 5CE_{es} - CE_i$, na qual CE_{es} é a tolerância limiar; 4) Rhoades & Merrill (1976), que calculam a salinidade média da zona radicular baseado no padrão de extração de água do solo 40, 30, 20, 10%, sucessivamente em frações de ¼ de profundidade da camada; e 5) Hoffman & Van genuchten (1983), que determinam a salinidade média da zona radicular pela equação da continuidade para o fluxo vertical da água do solo, assumindo uma função de absorção de água exponencial. Na Figura 10.2 são mostrados as correlações entre os valores experimentais e estimados em cada modelo. Entre os modelos testados, os mais satisfatórios, foram o exponencial, proposto por Hoffman & Genuchten ($r = 0,67$) e o que considera $CE_d^* = 5CE_{es} - CE_i$ de Rhoades ($r = 0,64$). Pelos valores dos coeficientes de correlação (0,67 ou menores), Hoffman (1985), concluiu que nenhum método é totalmente satisfatório. Indica também, que o modelo $CE_d^* = 5CE_{es} - CE_i$, pode ser utilizado para estimativas rápidas, fornecendo valores conservadores a altos de NL_m .

Pelo modelo de Rhoades (1974), a NL_m pode ser encontrada pela seguinte equação:

$$NL_m = CE_i/(5CE_{es}-CE_i) \quad (10.5)$$

Assumindo-se que toda a água aplicada na irrigação infiltra uniformemente no solo, sem perdas por escoamento superficial, a lâmina de água necessária para irrigação, será igual a quantidade de água requerida pela evapotranspiração (L_{et}) mais a de lavagem:

$$L_i = L_{et} + L_d \quad (10.6)$$

Combinando as Equações 10.4 e 10.6 pode-se obter:

$$L_i = L_{et}/(1-NL) \quad (10.7)$$

A Equação 10.7 fornece uma estimativa da lâmina de irrigação requerida baseada na tolerância aos sais e necessidade de água requerida pelas culturas e a salinidade da água de irrigação. No entanto, deve-se salientar que não leva em conta a variabilidade da infiltração da água no solo.

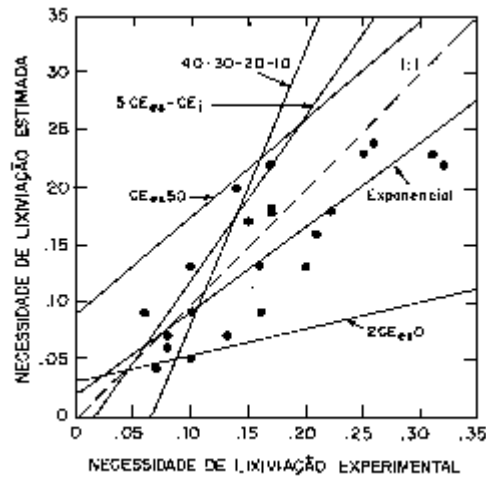


Figura 10.2 Correlação linear entre a necessidade de lavagem experimental e a estimada por diversos modelos. Os pontos representam apenas o modelo experimental (adaptada de Hoffman, 1985).

Segundo Shainberg & Oster (1978), a eficiência de lavagem, aplicando a Equação 10.7, nunca excede a 85% e, com irrigação superficial, pode ser tão baixa como 25%. Como os requerimentos de lavagem, para águas com $CE < 3 \text{ dS m}^{-1}$ e reduções de rendimento menores que 10%, dificilmente excedem 15%, a ineficiência na aplicação da água pode não necessitar de estimativas mais precisas da NL_m . No entanto, com o aumento de uso de águas salinas e métodos de irrigação mais eficientes, as limitações da Equação 10.7, passam a ser importantes. Mais detalhes são apresentados no Capítulo 8.

Necessidade de lavagem para recuperação

Existem diversos modelos de transporte de sais, que têm fornecido consideráveis conhecimentos sobre esse processo. No entanto, nenhum dos métodos matemáticos disponíveis descreve os múltiplos processos que ocorrem simultaneamente com o fluxo da água, incluindo a variabilidade espacial da taxa de infiltração, da condutividade hidráulica e todas as reações químicas (troca, dissolução e precipitação de sais, equilíbrio líquido/gás do CO_2) envolvidas no transporte de sais em condições de campo. Em conseqüência, a recuperação de solos afetados por sais se baseia principalmente em relações experimentais obtidas em condições de campo e experimentos de recuperação com lisímetros (Oster *et al.*, 1995). Por isto, para a determinação da lâmina de água e o tempo necessário de lavagem, é recomendável a realização de testes diretos no local a ser recuperado. Estes testes, mostrarão as dificuldades reais e a eficiência de lavagem encontradas em condições de campo.

Os testes de lavagem devem ser realizados em áreas representativas de solos e graus de afetação, e devem incluir: 1) a medição da quantidade de água aplicada, 2) o monitoramento da salinidade no perfil, antes, durante e após a lavagem, e 3) a avaliação das condições de fluxo do perfil, que pode ser obtida com o auxílio de piezômetros. Com os resultados dos testes, podem ser construídas as curvas de lavagem que mostram a

dessalinização desde um valor inicial (C_0) para um valor final (C), em função da quantidade efetiva de lavagem para uma dada profundidade do solo (ver métodos de lavagem, ítem 10.4.4).

10.4.3 Eficiência de lavagem

No processo de dessalinização, nem toda a água aplicada contribui para a lavagem dos sais. Da água infiltrada no solo, uma parte passa diretamente através das fendas e macroporos do solo e sai da zona radicular com a mesma concentração salina que entrou, enquanto outra parte se mistura com a solução do solo e sai da zona radicular com uma concentração salina que depende da proporção de mistura, sendo esta última, a que produz a lavagem. O processo de mistura das soluções salinas que ocorre no solo é denominado de deslocamento miscível, o qual combina os fenômenos de difusão e dispersão. A dispersão é a mistura das soluções causada pela distribuição irregular da velocidade de fluxo das soluções, pela heterogeneidade do meio (distribuição de poros); e a difusão é o transporte de moléculas ou íons devido a gradientes de concentração entre duas soluções.

Van der Molen (citado por Martinez, 1986) define a eficiência da lavagem (f) como a percentagem da água de irrigação que se infiltra no solo e se mistura com a solução do mesmo. A mistura da água do solo com a água de irrigação ocorre de forma desigual, no entanto, segundo Pizarro (1978), para efeitos práticos pode-se aceitar o conceito simples de fração misturada e fração não misturada sem perda de exatidão, devido a que os valores de f se determinam experimentalmente. Isto, permite estabelecer a relação entre as concentrações de sais das águas que participam no sistema, pela equação:

$$C_r = f.C_{cc} + (1-f).C_i \quad (10.8)$$

onde C_r , C_{cc} e C_i representam a concentração salina na água de lavagem, na solução do solo e na água de irrigação; e f e $1-f$ são as frações de água de irrigação que se misturam e não se misturam com a solução do solo, respectivamente.

A eficiência da lavagem varia com os métodos utilizados na aplicação da água, conforme pode ser observado nos itens a seguir.

10.4.4 Métodos de lavagem

Lavagem por inundação contínua

O método de aplicação de água e a textura do solo, são as principais variáveis que afetam a quantidade de água requerida para a recuperação dos solos salinos. Em estudos de lavagem de sais em solo de textura franco argilo siltoso, altamente salino ($CE_{es} > 40$ dS m^{-1}), utilizando o método de inundação contínua e água de boa qualidade ($CE < 2,5$ dS m^{-1}), Reeve *et al.* (1955) encontraram que para frações residuais de sais no perfil de 80% ou menores, os dados experimentais para o solo estudado, seguiam a equação:

$$L_d/L_s = 1/5(C/C_0) + 0,15 \quad (10.9)$$

sendo L_d a lâmina de água a ser lixiviada através de uma camada de solo de espessura L_s , e C_o e C representam a concentração média de sais, na camada de solo considerada, antes e após a lavagem, respectivamente. A Equação 10.9 pode ser reescrita em função da condutividade elétrica do extrato de saturação inicial $[(CEes)_i]$ e final $[(CEes)_f]$ do solo, conforme a Equação 10.10.

$$L_d/L_s = (CEes)_i/5(CEes)_f + 0,15 \quad (10.10)$$

A Equação 10.10 permite calcular a lâmina de água necessária para reduzir a salinidade de um solo a valores pré-determinados, e somente é validada para condições de solos similares as do experimento de Reeve *et al.* (1955), devido, como mencionado anteriormente, a que a eficiência de lavagem varia com a textura do solo. No entanto, esses estudos têm permitido generalizar que, nas lavagens por inundação contínua com águas de boa qualidade, 60% ou mais dos sais inicialmente presentes, podem ser lavados ou removidos por uma lâmina igual a profundidade do solo.

O efeito da textura do solo sobre a quantidade necessária para lixiviação dos sais em solos salinos pelo método de inundação contínua, tem sido demonstrada ao se estabelecer a relação entre a fração de concentração inicial de sais (C_o) e a remanescente no perfil (C), C/C_o , e a lâmina de água infiltrada (L_d) através de uma dada profundidade de solo (L_s), representada pela Equação 10.11 (Hoffman, 1986):

$$(C/C_o) (L_d/L_s) = K' \quad (10.11)$$

Nesta equação, os valores de K' variam com a textura do solo; L_d não inclui as perdas por evaporação e deve ser corrigida quando a evaporação é maior que 10% da lâmina de água que infiltra ($0,1L_d$). Assim, na recuperação de solos salinos, utilizando inundação contínua e dados de experimentos de campo realizados por vários pesquisadores, foram encontrados para solos turfosos, franco argilosos e franco arenosos, valores de K' de 0,35, 0,3 e 0,1, respectivamente. Esse comportamento é ilustrado na Figura 10.3.

A Equação 10.11 somente é válida quando $L_d/L_s > K'$. As diferenças entre K' , refletem diferenças no teor de umidade de saturação e na eficiência de lixiviação entre solos. Os solos franco arenosos com menor conteúdo de água de umidade apresentam maior eficiência de lixiviação que os solos de textura fina e, também, por possuírem poros de diâmetro mais uniforme que os solos argilosos e franco argilosos. A menor eficiência na lixiviação dos sais nos solos de textura fina é causada pela presença de fendas e poros grandes entre agregados e fendas na superfície que se formam quando secam e pelos poros finos dentro dos agregados, quando úmidos.

Lavagem por irrigação intermitente

Estudos em condições de campo têm mostrado que a lavagem dos sais através da aplicação de água por inundação contínua é menos eficiente que a inundação intermitente.

Miller *et al.* (1965), estudando o movimento de sais de cloro aplicados na superfície de um solo franco argiloso pelo método de inundação contínua e aplicações intermitentes de 2 polegadas de água, encontraram que nos dois regimes de lavagem, o perfil de distribuição de sais é diferente. Na inundação contínua, a distribuição de sais no perfil é

mais uniforme e promove uma grande superfície de concentração. Na inundação intermitente, o movimento dos sais é mais lento com picos mais pronunciados e uma pequena superfície de concentração. Quando compararam os resultados de campo verificaram que a penetração de 24 polegadas de água de forma intermitente teve o mesmo efeito que 36 polegadas de água por inundação contínua, indicando que o primeiro método requeria um terço menos de água.

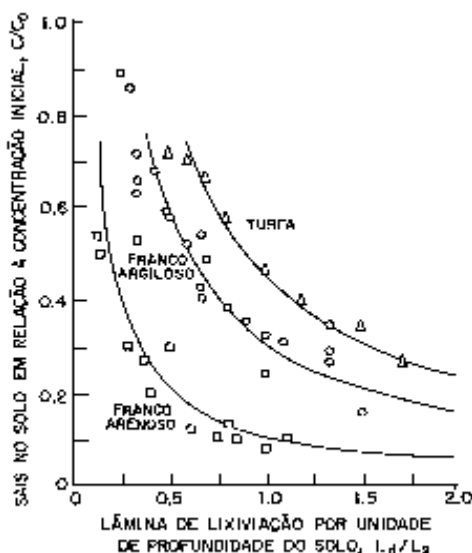


Figura 10.3 Lâmina de lixiviação, por unidade de profundidade de solo, necessária para recuperar um solo salino por inundação contínua (adaptada de Hoffman, 1986).

Na lavagem por inundação intermitente, a constante K' da Equação 10.9, adquire o valor de 0,1 para solos de textura argilo siltosa, franca e franco arenosa (Oster *et al.*, 1995). A uniformização da K' para solos de diferentes texturas é ilustrada na Figura 10.4, construída por Hoffmam (1986), com os dados experimentais de Oster *et al.* (1972) e Talsma (1967), obtidos com aplicações de lâminas de água que variaram de 50 a 150mm por ciclo e intervalos de inundação semanais e mensais. Em solos de textura fina, para remover 70% dos sais solúveis, a lâmina de água por inundação intermitente é em torno de um terço da requerida por inundação contínua

Ghuman *et al.* (1975) estudando o transporte e redistribuição de sais pela água, empregando diferentes quantidades e taxas de aplicação de água em solos com diferentes níveis de umidade inicial, encontraram que a frente salina coincidia com a frente de molhamento em solos inicialmente secos e começava a retardar-se em solos inicialmente úmidos. Imediatamente após a infiltração e redistribuição da água, para todos os conteúdos iniciais de água no solo, as maiores concentrações salinas ocorreram numa profundidade abaixo da qual, a água total armazenada se igualava a infiltrada, no entanto, a distribuição de sais no perfil aumentava quando aumentava o teor inicial de água no solo.

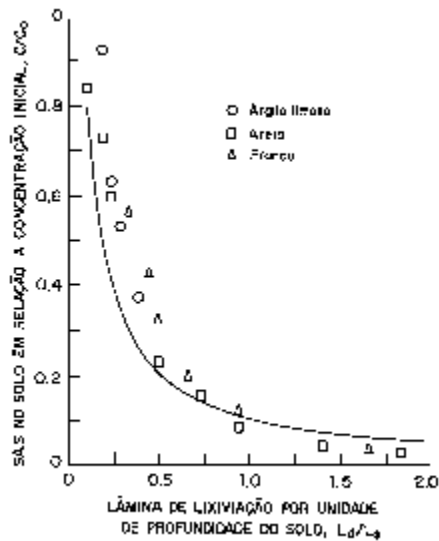


Figura 10.4. Lâmina de lixiviação, por unidade de profundidade de solo, necessária para recuperar um solo salino por inundação intermitente (adaptada de Hoffman, 1986).

A irrigação por aspersão também é usada com sucesso nas lavagens de recuperação de solos salinos. Na irrigação por aspersão, a taxa de aplicação de água pode ser ajustada para manter condições de fluxo não saturado de forma contínua, o que aumenta a eficiência da lavagem em relação à técnica de inundação contínua. Segundo Keller & Alfaro (1966), quanto menor a taxa de aplicação por aspersão, maior é o grau de insaturação do solo, aumentando a eficiência da água na remoção de sais. Oster *et al.* (1972), comparando métodos de aplicação da água na recuperação de um solo argilo siltoso, em experimento de campo, encontraram que a eficiência da lavagem segue a seguinte ordem: inundação intermitente > aspersão > inundação contínua.

As diferenças na eficiência de lavagem que ocorrem entre os métodos de aplicação de água, antes mencionados, estão associadas também às diferenças dos efeitos da difusão molecular, dispersão hidrodinâmica e efeitos de adsorção negativa, que ocorrem entre o fluxo saturado e não saturado.

Lavagem de solos sob cultivo

Uma prática comum é a manutenção de cultivos durante a recuperação de solos afetados por sais. Dentre os problemas que se apresentam está o número relativamente pequeno de culturas tolerantes a altos níveis de salinidade, principalmente nos primeiros estádios de desenvolvimento.

Altos níveis de salinidade retardam a germinação das sementes e reduzem o vigor das plântulas durante seu estabelecimento. Isto, também, dificulta a manutenção do teor adequado de água no solo e a prevenção de encrostamento, quando é necessária chuva ou irrigação adicional, pelo prolongamento do período de germinação e estabelecimento das plantas. Por outro lado, para garantir um bom estabelecimento da cultura, são necessários níveis de salinidade na zona de semeadura consideravelmente abaixo do nível limiar de

salinidade das culturas, as quais geralmente são baseadas na resposta das culturas à salinidade, após o desenvolvimento de plantas bem estabelecidas. Por exemplo, no caso do algodão, quando a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo na zona de semeadura é maior que $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ (salinidade limiar de $7,7 \text{ dS m}^{-1}$), são necessários de 5 a 7 dias adicionais aos normalmente utilizados (10 dias) para a germinação e estabelecimento das plântulas (Oster *et al.*, 1995).

No caso de culturas como o arroz e capim Karnal, que podem germinar ou serem transplantadas em condições de alagamento, é possível contornar em parte os problemas causados pela salinidade durante o estabelecimento das plântulas. Assim, por exemplo, na Califórnia, sementes pré-germinadas de arroz são distribuídas em campos inundados por aeronaves, de maneira, que as mesmas, são expostas primeiro a baixa salinidade da água de inundação. Isto é possível, pelo fato do arroz possuir um sistema radicular superficial fasciculado, que desenvolve após o estabelecimento das plântulas. De forma similar, pode-se realizar o plantio por transplante de mudas de arroz obtidas em condições de baixa salinidade, em estádios de desenvolvimento mais tolerantes.

Quando a salinidade do solo é alta ($CE_{es} > 10-15 \text{ dS m}^{-1}$), é recomendável a lavagem dos sais na zona de semeadura antes do plantio, para assegurar o estabelecimento da cultura. Na maioria das culturas, os estádios iniciais de crescimento são mais sensíveis à salinidade, sendo as falhas na germinação e o baixo vigor das plântulas, as principais causas da redução na produção. Após a lavagem inicial e estabelecimento da cultura a recuperação pode ser continuada através de aplicação de água extra na irrigação das culturas.

O estabelecimento das condições de salinidade apropriada na zona de semeadura, além da salinidade da água de irrigação, depende da tolerância à salinidade da cultura escolhida, de que a redução na produção (potencial de produção) seja aceitável e da salinidade média atual da zona radicular.

A tolerância relativa à salinidade para a maioria das culturas, expressa como potencial de produção para diferentes níveis de salinidade na zona radicular (CE_{es}) podem ser obtidos de valores tabelados (Capítulo 4). Uma relação da tolerância relativa aos sais para diversas culturas (cereais, fibras, hortaliças e forrageiras) são reportadas por Maas & Hoffman (1977). Assim, a necessidade de lavagem pode ser estimada, utilizando os valores da CE_{es} de acordo com a cultura selecionada e potencial de produção desejado ou que a salinidade da água de irrigação permite.

Recuperação de solos com altos teores de boro

O boro é um micronutriente essencial para as plantas. Pelo fato de ser exigido em pequenas quantidades, pequenas variações nas concentrações podem conduzir a deficiências ou a toxicidade. Embora o **B** seja relativamente móvel no solo, é mais difícil de lixiviar que os sais de sódio, devido a que pode ser adsorvido pela matéria orgânica, minerais de argila, e óxidos de Fe e Al do solo (Sims & Bingham, 1968; Singh, 1970; Keren & Gast, 1983; Keren & Bingham, 1985). Assim, solos com altos teores de boro nativo, após a lavagem, a redução na concentração pode ser temporária, aumentando novamente, pela liberação do boro previamente adsorvido, principalmente nos primeiros estágios de recuperação (Bingham *et al.*, 1972; Oster *et al.*, 1995). Reeve *et al.* (1955) e Bingham *et al.* (1972) estudando a recuperação de solos com altos teores de boro, pelo método de inundação contínua, encontraram que uma lâmina de água igual a profundidade

do solo, eliminava 80 % dos sais solúveis não adsorvidos, enquanto que, para a remoção do boro, era necessária cerca de três vezes mais água.

Na recuperação de solos com altos conteúdos de boro, os métodos de irrigação também influenciam na eficiência da lixiviação do B. Na Figura 10.5 são apresentados os resultados obtidos na recuperação de dois solos com altos teores de boro nativo pelos métodos de inundação intermitente (Reeve *et al.*, 1955) e aspersão (Bingan *et al.*, 1972). Usando esses dados na Equação 10.9, o K' apresenta valor igual a 0,6 (Hoffman, 1986). Por isto, Oster *et al.* (1995) indicam que a quantidade de água requerida para remover a mesma fração de boro pelos métodos de irrigação intermitente e aspersão, é cerca de duas vezes maior que a requerida para remover os sais solúveis pela inundação contínua. No entanto, pode ser necessário maior número de lavagens quando ocorre regeneração na concentração de **B**, pela liberação do boro adsorvido.

10.5 RECUPERAÇÃO DOS SOLOS SÓDICOS OU SALINO-SÓDICOS

Em muitas áreas a salinidade do solo ocorre conjuntamente com o aumento dos níveis de sódio originando os solos salino-sódicos. À medida que a concentração dos sais solúveis são eliminados, através da irrigação ou pela água da chuva, os teores de sódio são aumentados conduzindo à formação dos solos sódicos. O elevado pH apresentado por esses solos deve-se tanto a hidrólise do carbonato de sódio ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \Rightarrow 2\text{Na}^+ + \text{CO}_3^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2\text{Na}^+ + 2\text{OH}^- + \text{H}_2\text{CO}_3$), quanto ao do sódio adsorvido (micela-Na + HOH \Leftrightarrow micela -H + $\text{Na}^+ + \text{OH}^-$). A elevada concentração salina e o alto pH restringem a disponibilidade de nutrientes, e os altos níveis de sódio dispersam a argila do solo, reduzindo a agregação das partículas e diminuindo o movimento de ar e água e, por conseguinte, dificultando o manejo do solo e o desenvolvimento radicular.

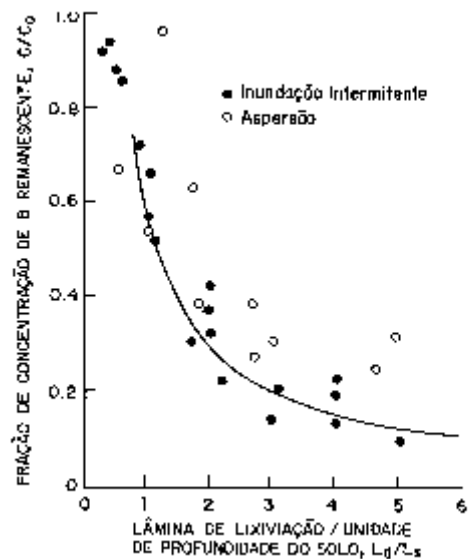


Figura 10.5 Lâmina de água de lixiviação por unidade de profundidade do solo, necessária para recuperar um solo com alto teor de boro (adaptado de Hoffman, 1986).

A recuperação de solos afetados por sódio envolve a substituição do sódio trocável pelo cálcio o qual pode ser oriundo da dissolução de minerais do solo, do gesso e cloreto de cálcio, ou da água de irrigação com íons de cálcio. A correção de solos salino-sódicos exige a remoção de parte ou da maioria do sódio trocável que faz parte do complexo de troca do solo, e sua substituição por outros íons, preferencialmente o cálcio, na zona radicular. Isso pode ser feito de muitas maneiras, dependendo das fontes de corretivos disponíveis, tipos de culturas que serão desenvolvidas e da intensidade de degradação do solo.

Quanto aos métodos para recuperação de solos sódicos, os mesmos podem ser agrupados em três principais categorias: melhoria física (isto é, inversão do subsolo rico em cálcio); melhoria química (ou seja, a substituição do sódio e magnésio pelo cálcio; utilização do efeito eletrólito dos sais dissolvidos); e melhoria biológica (uso de plantas, adição de matéria orgânica). A combinação dessas técnicas são algumas vezes necessárias para reduzir a expansão da argila e prevenir sua dispersão, melhorando a estabilidade estrutural dos agregados, reduzindo o encrostamento e promovendo aumento da infiltração da água e da aeração do solo (Mckenzie *et al.*, 1993). Todas essas melhorias dependem basicamente da eliminação do excesso de sódio trocável do perfil do solo, o que exige a aplicação de melhoradores químicos.

10.5.1 Diferentes melhoradores químicos e modo de ação

O tipo e a quantidade de melhorador químico que se deve aplicar para substituir o sódio trocável em solo salino-sódico ou sódico, depende das características próprias do solo. Influem, quer direta ou indiretamente, seu conteúdo de cálcio, sódio e de magnésio, o pH, a velocidade de substituição do sódio e o custo da correção por unidade de cálcio solúvel.

Os melhoradores químicos que se usam na recuperação de solos afetados por alta concentração de sódio trocável são materiais que, através da ação química ou microbiológica, fornecem cátions divalentes, usualmente o cálcio, para substituir o sódio trocável. Os melhoradores químicos para correção de solos salino-sódicos ou sódicos têm sido agrupados em três tipos. Suas principais propriedades encontram-se na Tabela 10.1.

1. Sais solúveis de cálcio: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, CaCl_2 e fosfogesso
2. Sais de cálcio pouco solúveis : calcário
3. Ácidos ou sais que formam ácidos: enxofre, ácido sulfúrico, sulfeto ferroso, sulfato de alumínio e pirita (FeS_2).

A melhoria química é frequentemente o primeiro passo na correção. Os melhoradores comumente utilizados para fornecer cálcio solúvel são o gesso, o cloreto de cálcio, o ácido sulfúrico e o enxofre, isso devido a sua eficácia e custo relativamente baixo. Evidentemente, outros melhoradores que não apresentam cálcio em sua composição, mas produzem cálcio, pela conversão de CaCO_3 nativo do solo em gesso, tais como o ácido sulfúrico, enxofre e sulfatos de alumínio, também são recomendáveis. Os Melhoradores químicos podem aumentar a percolação da água em solos com excesso de sódio, desde que

a textura, a compactação ou camadas que restringem o movimento d'água não sejam a causa da baixa permeabilidade.

Tabela 10.1 Propriedades químicas de vários corretivos.

Corretivo	Composição química	Descrição física	Corretivo equivalente a 1 kg do quimicamente puro :	
			Gesso (kg)	S (kg)
Gesso	CaSO ₄ . 2 H ₂ O	mineral branco	1,00	5,38
Enxofre	S ₈	elemento amarelo	0,19	1,00
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	líquido corrosivo	0,57	3,06
Carbonato de cálcio	CaCO ₃	mineral branco	0,58	3,13
Cloreto de cálcio	CaCl ₂ . 2H ₂ O	sal branco	0,85	4,59
Sulfato ferroso	FeSO ₄ . 7 H ₂ O	sal verde-azulado	1,61	8,69
Sulfato férrico	Fe ₂ (SO ₄) ₃ .9H ₂ O	sal amarelo-marron	1,09	5,85
Sulfato de alumínio	Al ₂ (SO ₄) ₃ . 18H ₂ O	cor :amarelo-claro	1,29	6,94
Pirita (30 % S)	FeS ₂	mineral amarelo	0,63	1,87

Gesso

O gesso é um minério com solubilidade de aproximadamente 2,1 g ℓ⁻¹ a 25°C, muito utilizado em todo o mundo como fonte de cálcio responsável pelo deslocamento do sódio trocável, durante a correção dos solos sódicos ou salino-sódicos. Quanto ao íon sulfato, tende a neutralizar o sódio da solução, originando o sulfato de sódio decahidratado (Na₂SO₄.10H₂O) que, após a adição de água, é lixiviado. Evidentemente o sulfato de cálcio tem que inicialmente sofrer dissolução para que a recuperação dos solos salino-sódicos ou sódicos possa ocorrer de forma satisfatória. Além disso é necessário que a área salinizada disponha de uma rede de drenagem em funcionamento, capaz de receber todo o excesso de água adicionado ao solo. A Figura 10.6 mostra esquema ilustrativo.

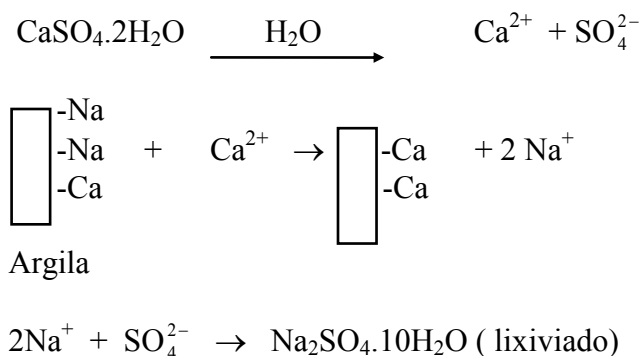
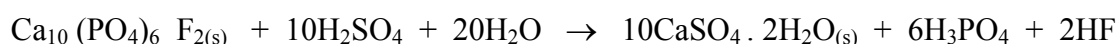


Figura 10.6 Solubilização do gesso, neutralização do sódio e lavagem do sal.

O gesso apresenta vários produtos de hidratação, sendo os mais comuns a anidrita (CaSO_4) e a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), tendo uma distribuição bastante abrangente por todo o mundo em depósitos sedimentares de evaporitos. Após a evaporação da água em solos ricos em cálcio, o gesso é um dos primeiros minerais a precipitar. À alta temperatura ($>42^\circ\text{C}$) a anidrita pode precipitar antes do gesso, mas o mineral dihidratado é muito mais comum. Embora normalmente os depósitos de gesso sejam puros, pode-se encontrar impurezas de carbonatos de cálcio e magnésio e sais de sulfato, assim como de óxidos de ferro (Shainberg *et al.*, 1989). No Brasil, o gesso é encontrado em grande quantidade no Nordeste, na Serra do Araripe, nos Estados de Pernambuco e Ceará. A composição média do minério de gesso de Araripina revela 19% de sulfato e 12% de cálcio, solúveis em água.

Uma fonte não geológica do gesso refere-se a produção industrial do ácido fosfórico de fosfatos de rocha (apatita) pelo processo de acidulação via úmida:



O ácido fosfórico é utilizado na fabricação de fertilizantes fosfatados concentrado, o superfosfato triplo, enquanto o subproduto gesso é coletado como resíduo, sendo denominado de fosfogesso. Tal produto obtido na proporção de $5,5 \text{ Mg Mg}^{-1}$ de P_2O_5 apresenta a seguinte composição aproximada (base seca): $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (96,50%), $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,31%) e $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]_3 \cdot \text{CaF}_2$ (0,25%).

Tanto o gesso quanto o fosfogesso podem ser utilizados na recuperação de solos salinos-sódicos, já que apresentam altas concentrações de cálcio e enxofre. Por apresentarem em sua composição metais pesados (Tabela 10.2) e radioisótopos, cuidados especiais devem ser tomados durante sua aplicação em solos salino-sódicos. Entre os radionuclídeos pode-se encontrar o ^{226}Ra , ^{210}Po e ^{210}Pb . Deve-se ter preocupação com o seu efeito na água subterrânea, no solo, nas culturas e na atmosfera.

Tabela 10.2. Análise total do gesso e do fosfogesso.

Componentes e Elementos	Gesso		Fosfogesso
		%	
H_2O	15,9-20,2		14,4-18,8
CaO	31,2-34,7		26,9-31,1
SO_3	44,2-46,7		31,9-42,0
P_2O_5	ND		0,5-3,7
$\text{SiO}_3 + \text{insolúveis}$	0,1-2,5		3,2-17,7
Al_2O_3	<0,01-0,13		<0,1-0,9
F	ND		0,2-0,8
Fe_2O_3	0,04-0,31		<0,05-0,2
MgO	0,03-0,70		<0,05
CO_2	<0,1-2,5		ND
		mg kg^{-1}	
Arsênio	ND		2-8
Cádmio	ND		3-6
Cobre	ND		7-11
Chumbo	ND		2-12
Selênio	ND		<0,5-2
Potássio	ND		20-86
Sódio	ND		150-4500

ND = Não Determinado

A quantidade de sódio a ser substituída durante a correção depende do fração inicial de sódio trocável (**PSTi**), da capacidade de troca de cátions (**CTC**), da densidade do solo (**Ds**), da fração final de sódio trocável desejada (**PSTf**) e da profundidade do solo a ser corrigido (**h**). A necessidade de gesso pode ser estimada pela relação:

$$NG = \frac{(PSTi - PSTf) \cdot CTC \cdot 86 \cdot h \cdot Ds}{100} \quad (10.12)$$

onde,

NG - Necessidade de gesso (kg ha^{-1});

(PSTi - PSTf) - diferença entre a percentagem de saturação por sódio inicial e final (desejada);

CTC - capacidade de troca de cátions na camada do solo a ser corrigida;

86 - peso equivalente do gesso;

h - profundidade (cm) do solo a ser corrigida;

Ds - densidade do solo (g cm^{-3}).

Chauchan & Chauchan (1979) sugerem o cálculo da necessidade de gesso utilizando a relação: $Y = 1,1 \cdot X - 0,52$, onde Y corresponde aos teores de sódio trocável ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e X é a necessidade de gesso ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Estima-se também que para a correção de 1 mmol_c de sódio, até uma profundidade de 15 cm, precisa-se de aproximadamente $2,016 \text{ mg}$ de CaSO_4 .

A correção de solos salino-sódicos objetiva eliminar os excessos de sais solúveis e de sódio trocável. No caso específico de solos sódicos a neutralização e lixiviação do sódio é meta prioritária. Nesse processo exige-se a aplicação de gesso que, através de substituições iônicas ou por elevar a concentração de eletrólitos na solução do solo, reduz o efeito prejudicial do sódio do solo e, conseqüentemente a dispersão de argilas. Tal dispersão é influenciada ainda pela presença de outros íons no complexo de troca, principalmente o magnésio, e também pela mineralogia e pela reação do solo.

A aplicação do gesso ao solo mostra que há um rápido deslocamento inicial do sódio retido nos pontos de troca por pequenas quantidades de gesso, seguida por substituições mais lentas do sódio remanescente. A intensidade das trocas iônicas depende da concentração de cálcio na solução do solo, o que é função da solubilidade do gesso. Essa é aumentada pela redução dos coeficientes de atividade do cálcio e sulfato na solução. O aumento da força iônica da solução, com o tempo, tende a reduzir a solubilidade do corretivo, e também a intensidade das substituições do sódio pelo cálcio. Portanto, a quantidade de gesso dissolvido é função linear dos moles de Na^+ trocáveis substituídos. Esta constatação foi verificada por Oster & Frenkel (1980), após homogeneização do gesso com soluções de sais sódicos. Acrescentam que, há uma redução na eficiência de dissolução do sulfato de cálcio com o decréscimo da concentração de sódio trocável. Evidentemente apenas parte do gesso participa das trocas iônicas, esse valor situa-se em torno de 53% (Greene & Ford, 1985).

Quando o cálcio é substituído pelo sódio, as ligações entre as partículas de argila são enfraquecidas e os íons sódio são ligados fracamente às superfícies das argilas,

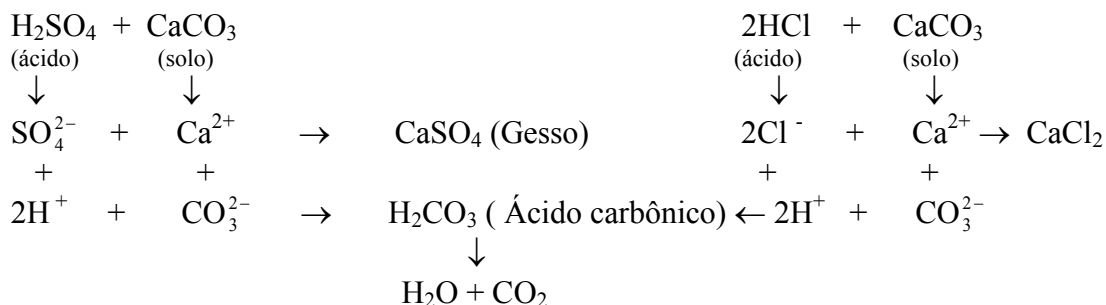
comportamento que é acentuado pelo maior grau de hidratação do sódio (Emerson, 1994). O gesso provoca também deslocamento do magnésio trocável. Seu efeito nas trocas iônicas às vezes é muito lento e prolongado demonstrando que de 1/3 a 1/2 do cálcio usado desloca o magnésio (Loveday, 1976). Tais resultados estão de acordo com aqueles obtidos por Armstrong & Tanton (1992), os quais citaram que, 64 a 74% do cálcio aplicado via fosfogesso foi usado em processo de trocas e que 1/3 do cálcio adsorvido deslocou o magnésio trocável. A eliminação do magnésio do solo é importante pois, assim como o sódio, ele provoca dispersão das argilas, devido ao seu elevado raio hidratado, principalmente em solos com baixa concentração de eletrólitos. Normalmente os solos sódicos com maior concentração de magnésio têm poder dispersivo mais elevado, e o sódio é mais adsorvido na presença de magnésio que de cálcio.

Além de participar nos processos relativos às trocas iônicas, o gesso aplicado em solo salino-sódico acarreta aumento na concentração de eletrólitos na solução do solo. Na realidade, os dois processos ocorrem simultaneamente. Sua ação conjunta proporciona a maior neutralização e a remoção, tanto do sódio trocável quanto dos outros íons, tais como o magnésio e o cálcio. Portanto, após a percolação de água em solo salinizado, são lixiviados, outros sais, além dos de sódio. A mineralogia predominante no solo também influi na correção de solos afetados por sais, já que os solos com predominância de ilitas e montmorilonitas, tendem a apresentar uma menor remoção do Na^+ trocável (Chaudhry & Warkentin, 1968).

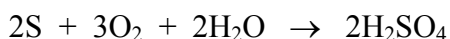
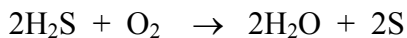
O efeito eletrólito e das trocas de cátions na K, comparando os efeitos do gesso e do CaCl_2 aplicados em quantidades quimicamente equivalentes, foi estudado por Shainberg *et al.* (1982), quando observaram que a infiltração de água destilada, em solos não calcários inicialmente tratados com CaCl_2 decresceu e em seguida parou, enquanto que no tratamento com gesso a K foi mantida alta. Não se constatou nenhuma diferença entre os dois melhoradores em um solo calcário. Como ambas as correções apresentaram similar substituição do sódio, eles atribuíram a diferença ao efeito eletrólito. Desse modo, a liberação de eletrólitos deve ser garantida para manter a alta K dos solos quando se usa água de baixa concentração salina. Se o efeito eletrólito é suficiente para prevenir a dispersão e expansão da argila do solo, a aplicação superficial de gesso pode ser vantajosa.

Ácidos e enxofre

O ácido sulfúrico é um melhorador que corrige os solos afetados por sódio. Em algumas localidades os resíduos ácidos de minas e de atividade industrial estão disponível. O uso desses produtos como melhoradores é uma forma segura de aproveitá-los. O ácido reage com o carbonato de cálcio para formar gesso (usando H_2SO_4) ou cloreto de cálcio (usando HCl), como mostra as reações seguintes:



Particularmente quanto ao enxofre elementar, passa inicialmente por uma fase de oxidação microbiológica para produzir o H_2SO_4 . Esse processos de oxidação do S no solo são efetuados por bactérias aeróbicas e anaeróbicas (Fassbender, 1986):



Diversos pesquisadores utilizaram o H_2SO_4 em solos com problemas de sais e sódio. Experimentos de campo tem demonstrado melhor efeito na produção quando se usa H_2SO_4 (Ouverstreet *et al.*, 1951). O ácido concentrado, aplicado diretamente na superfície do solo, resulta em melhor distribuição dos agregados do solo, e em uma maior lixiviação dos sais (Miyamoto *et al.*, 1975a). A aplicação pode ser feita através da água de irrigação, o que reduz o risco de manipulação do produto. Yahia *et al.* (1975) aplicaram H_2SO_4 (1, 5, 10, 15 e 20 Mg ha⁻¹) e gesso (1,75; 8,75; 17,5; 26,2 e 35 Mg ha⁻¹) em solos com PST variando de 0,4 a 100 %. Os resultados indicaram que o H_2SO_4 superou o gesso, quanto ao efeito na melhoria da permeabilidade do solo à água, especialmente nos valores mais altos de PST foram confirmados por Pratter *et al.* (1978). Niazi *et al.* (1992) avaliaram a influência do H_2SO_4 (100 e 200 Mg ha⁻¹) e HCl (325 e 650 Mg ha⁻¹) em solo salino-sódico, em combinação com sulfato de amônio e cloreto de amônio como fonte de nitrogênio (126 Mg ha⁻¹ de N), na produção de arroz. Os resultados indicaram que ambos os corretivos, misturados com as fontes nitrogenadas e superfosfato simples (50 Mg ha⁻¹), aumentaram significativamente a produção de arroz, com clara superioridade do H_2SO_4 . Jones *et al.* (1993) constatarem, 28 dias após aplicação de soro (ácido) de requeijão em solo sódico, que ocorreu aumento na produção de matéria seca de cevada. A adição de 0, 25, 50 e 100 mm de soro proporcionou, valores de produção de matéria seca de 0,54; 0,72; 2,0 e 1,4 kg m⁻², respectivamente. Constatarem ainda, uma redução da PST, da RAS e do pH do solo devido a aplicação do corretivo.

Acidulantes que primeiro devem ser oxidados, tais como enxofre (S) e pirita (FeS_2), agem mais lentamente que o H_2SO_4 . Sua eficiência no campo tem variado, dependendo da população de microorganismos. A utilização de ácidos tem uma vantagem adicional de reduzir o pH do solo aumentando a disponibilidade de P, Zn, Mn e Fe.

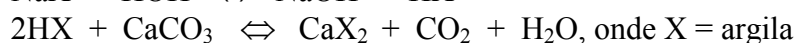
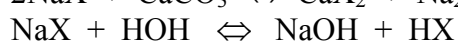
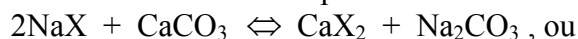
Cloreto de cálcio

Embora o $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ geralmente seja mais caro que os demais corretivos, ele é produzido como resíduo industrial e pode ser utilizado na recuperação de solos com excesso de sódio trocável em seu complexo de troca. Sendo muito solúvel, o $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ inicialmente produz uma alta concentração de eletrólitos e elevada taxa de infiltração de água. Isso torna-o um corretivo mais eficiente que o gesso em solos com alta fração de sódio trocável. No entanto, devido a elevada solubilidade do CaCl_2 , ele é rapidamente lixiviado do perfil do solo, proporcionando menos trocas iônicas do Ca^{2+} com o Na^+ . Assim, devido a rápida redução na concentração de íons da solução, os solos não calcários podem apresentar uma drástica redução em sua permeabilidade, já que a concentração de eletrólitos na solução passa a ficar abaixo da concentração limiar de eletrólitos. Recomenda-se o uso combinado do gesso e do CaCl_2 para a correção de solos salino-sódicos.

Sais pouco solúveis : calcário

A rocha calcária moída também constitui uma alternativa para recuperação de solos com problemas de salinidade e sodicidade. Os produtos que podem ser utilizados são o carbonato de cálcio e ou o carbonato de magnésio. No entanto, devido sua baixa solubilidade (CaCO_3 - $0,014 \text{ g } \ell^{-1}$ a 25°C , MgCO_3 - $0,106 \text{ g } \ell^{-1}$ a 25°C), tem sido pouco recomendado. O fato é que seu efeito restringe-se principalmente a aumentar a concentração de eletrólitos; as trocas iônicas Na-Ca ocorrem de uma forma muito lenta. Normalmente o efeito do calcário na correção dos solos sódicos ou salino-sódicos tem sido inferior ao gesso, o que é explicado por sua baixa capacidade de dissolução. Portanto, a pouca utilização do calcário em solos sódicos deve-se a dois principais motivos: sua baixa solubilidade e sua função cimentante pouco expressiva.

A sequência de reações apresentadas pelo calcário quando aplicado em solos salino-sódicos envolvem as etapas:



A análise econômica, durante o período de três anos, demonstrou que em solos com $\text{PST} > 7$ a mistura de gesso (5 Mg ha^{-1}) com calcário ($2,4 \text{ Mg ha}^{-1}$) apresentou melhor resultado na correção Na^+ trocável (Mckenzie *et al.*, 1990). Em solos menos sódicos ($\text{PST} \cong 6$), o calcário ($4,8 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi a melhor opção, apesar de aumentar o pH da camada superficial em 0,7. Evidentemente, pesquisas adicionais são necessárias para determinar: a) o risco dos sais NaHCO_3 e Na_2CO_3 provocarem toxidez, particularmente em áreas onde a água subterrânea reciclada é aplicada no solo; b) a dinâmica de aplicação do calcário e, c) o tempo necessário para o calcário neutralizar o Na^+ ou melhorar a agregação do solo.

10.5.2. Adequabilidade dos corretivos

Entre os corretivos capazes de reagirem com o sódio, pode-se citar: o gesso, o fosfogesso, o ácido sulfúrico, o S elementar, o cloreto de cálcio e o carbonato de cálcio. Como todos esses melhoradores podem intensificar as trocas iônicas Na-Ca e a concentração de eletrólitos na solução do solo, evidentemente a utilização de qualquer um

desses traz benefícios quando aplicados em solos sódicos ou salino-sódicos. Optar pelo mais adequado depende de uma série de fatores, entre os quais, a disponibilidade do produto, seu custo, perigo de manuseio, sua solubilidade e o tempo de reação. A utilização do gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) tem sido frequente, devido seu baixo custo, disponibilidade e por ser de fácil manuseio. Além do fato de que pode também funcionar como fonte de enxofre e cálcio para as plantas (Santos, 1995). A eficiência do gesso depende do tamanho da partícula; quanto mais fino, maior a eficiência. O uso do gesso com diâmetro inferior a 2 mm tem sido recomendado por aumentar a sua dissolução e reduzir a precipitação do cálcio (CaCO_3), aumentando sua eficiência (Chawla & Abrol, 1982). Enquanto o gesso é um sal neutro, o fosfogesso é altamente ácido; seu pH em água (1:1) varia de 2 a 5, principalmente devido a impurezas ácidas, tais como ácido sulfúrico, fosfórico, etc. No entanto, pela presença de metais pesados e radionuclídeos no fosfogesso, há uma constante preocupação ambiental quanto ao seu uso na agricultura. Apesar de que sob condições de campo, após incorporação do gesso e do fosfogesso a 0,5 cm no solo e a irrigação com a taxa de 1 cm h^{-1} , verificou-se que o segundo proporcionou um aumento na concentração de eletrólitos correspondente ao triplo do primeiro, para um aplicação de 5 Mg ha^{-1} e ao dobro para doses superiores ($> 5 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Oster *et al.*, 1980).

Quanto ao ácido sulfúrico ou outros ácidos, sua utilização vem se consolidando, pois há uma preocupação atual de atentar não apenas para a eliminação do sódio trocável e a conseqüente redução na dispersão das partículas do solo, e sim no efeito do corretivo na reação do solo. Tal alternativa justifica-se já que na maioria dos trabalhos o efeito benéfico proporcionado pela utilização do corretivo químico em solos salino-sódicos, não tem correspondido proporcionalmente a um aumento na produção das culturas. Por exemplo, a utilização de ácido sulfúrico não apresentou efeitos significativos nas produtividades de arroz e capim camerom, embora tenha provocado redução no PST do solo (Gheyi *et al.*, 1995). Mas o uso de outra fonte ácida, o H_3PO_4 , em solo salino-sódico proporcionou aumento significativo na absorção de N, P e S pelo feijoeiro (Santos, 1996).

O uso do ácido sulfúrico, por sua imediata solubilidade apresenta-se adequado para correção dos solos calcários, por solubilizar rapidamente o CaCO_3 , liberando Ca^{2+} para a solução do solo. Entretanto, deve-se ter cuidados especiais com seu manuseio, aplicando-o sempre diluído. Sua principal vantagem é que reduz o pH, aumentando a disponibilidade de nutrientes e a atividade de microorganismos.

Quando se deseja uma rápida correção, pode-se utilizar o CaCl_2 , por apresentar efeito imediato. Porém, caso a correção do solo seja acompanhado por uma cultura semi-perene, recomenda-se aplicar um corretivo de reação lenta, tais como o S e o CaCO_3 . A necessidade da ação microbiana ou a sua menor solubilidade fazem com que tais corretivos liberem lentamente o Ca^{2+} para a solução do solo e com isso a recuperação do solo salino-sódico seja retardada.

10.5.3 Métodos de aplicação dos corretivos

Por serem produtos de composição química diferentes e por apresentarem reações específicas no solo. Os corretivos devem ser aplicados sob diferentes formas no solo salino-sódico. O método de aplicação do corretivo de sodicidade depende da profundidade do solo a ser recuperado, o que é função da cultura ou sequência de culturas a ser

implantada no solo salino-sódico. Por exemplo, em cultivo de arroz, por sua tolerância às condições salinas, a incorporação do corretivo a apenas 15 cm de profundidade tem-se mostrado eficiente. Resultados tem demonstrado que a mistura do gesso até uma certa profundidade é preferível à incorporação até camadas mais profundas.

Normalmente a incorporação do gesso no solo ocasiona maior lixiviação de sais que quando aplicado superficialmente. Contudo, outros resultados indicam que o gesso espalhado na superfície do solo proporcionou maior infiltração de água que quando misturado na camada superficial do solo (Keren *et al.*, 1983). A quantidade de gesso aplicado depende do nível de salinidade da água aplicada e da taxa de dissolução do gesso. As doses aplicadas na região semi-árida variam de 5 Mg ha⁻¹ a 10 Mg ha⁻¹. A mistura do gesso a maiores profundidades reduz a eficiência de correção devido seu efeito diluição (grande relação solo/gesso). Em áreas com superfícies endurecidas e problemas de infiltração de água, a incorporação do gesso a pequenas profundidades é considerada melhor.

Corretivos tais como pirita e S elementar que devem sofrer oxidação pelos microorganismos do solo, devem ser aplicados na superfície ou misturados a poucos centímetros da superfície do solo. A aplicação de água em excesso são desfavoráveis à oxidação desses materiais e reduzem sua ação química. O ácido sulfúrico pode ser aplicado diretamente na superfície por razão de melhor distribuição, menor destruição dos agregados e lixiviação mais eficiente dos sais.

10.5.4 Lavagem

O emprego de melhoradores químicos para recuperar solos salinos-sódicos ou sódicos, além de neutralizar a Na⁺ trocável proporciona melhorias nas propriedades físicas do solo devido a redução de seu poder dispersivo e, com isso há um aumento na agregação e permeabilidade do solo. Entretanto, a correção apenas se verifica após a eliminação do excesso de sais do perfil, que exige a aplicação de uma lâmina de água através da matriz do solo.

A lavagem é uma maneira prática de recuperar solos afetados por sais, já que as plantas removem quantidades insuficientes de sais. A lixiviação dos sais ocorre através do perfil do solo, e remove os sais da zona radicular. Assim, o solo para ser recuperado deve ser permeável e ter sistema de drenagem. O grau de lixiviação depende principalmente da salinidade inicial do solo, da tolerância da cultura e do nível do lençol freático. Portanto, deve-se reduzir a concentração salina, não a grandes profundidades do solo, mas na zona radicular. A lixiviação dos sais origina uma água altamente salina que pode contaminar os mananciais de água e contribuir para elevar o lençol freático. A avaliação do impacto ambiental e sua implicação legal devem constar no programa de recuperação dos solos salino-sódicos.

A eficiência da lavagem dos sais pode ser definida como a quantidade de sais solúveis lixiviados por unidade de volume d'água aplicada. Quando a lixiviação dos sais deve ocorrer em um curto espaço de tempo ou sob elevada condição de evaporação, deve-se considerar o fator tempo. Os fatores que determinam a eficiência da drenagem são a salinidade inicial do solo, a quantidade de água aplicada, o conteúdo de água do solo

durante a lavagem, a dispersão hidrodinâmica, a variação espacial e o esquema do sistema de drenagem.

A eliminação dos sais solúveis do solo se consegue mediante a técnica de lavagem, que consiste em fazer passar através do solo uma certa quantidade de água que arrasta consigo esses sais. Para que a lavagem seja eficiente, necessita-se que o solo tenha uma drenagem que permita que as águas com elevada concentração salina sejam eliminadas da zona radicular. Portanto, uma característica do solo que facilita a lavagem é sua boa permeabilidade (Pizarro, 1978).

A lavagem dos sais tem duas finalidades principais: 1^a) reduzir a salinidade inicial do solo a níveis toleráveis pelas culturas. Esse é o caso, por exemplo, da recuperação de solos salinos. Tal recuperação requer o uso de grandes quantidades de água. 2^a) manter a concentração salina do solo em um nível baixo. Para isso, pode-se realizar dois tipos de lavagem de manutenção: a) aproveitar a irrigação para lavar o solo, aplicando água em excesso; e b) realizar lavagens periódicas, independentemente da irrigação (semestral, anual, etc). Entre os métodos de lavagem, Tanji *et al.* (1990) citam: inundação contínua, inundação intermitente, aspersão, lixiviação por bordadura ou linhas alternadas. A correção utilizando apenas água, sem corretivo, pode fornecer bons resultados. Nesse caso, é preciso uma boa drenagem através do perfil do solo, adequada água para lixiviação dos sais, e um solo com alta concentração de cálcio. Os solos salino-sódicos frequentemente apresentam CaCO_3 e gesso precipitados que, durante a lixiviação, podem sofrer dissociação e originar suficiente concentração de Ca^{2+} para substituir o Na^+ trocável. Inundações intermitentes exigem menos água que àquelas contínuas para alcançar o mesmo grau de lixiviação (Miller *et al.*, 1965). A irrigação por aspersão é mais eficiente que outros métodos para remover os sais dos microporos no perfil do solo.

10.5.5 Eficiência de recuperação

A eficiente correção dos solos salino-sódicos depende não apenas de fatores externos, tais como a quantidade de melhoradores, profundidade de mistura, fluxo de água, etc, mas também das propriedades físicas dos melhoradores, tais como tamanho da partícula e modo de aplicação do corretivo. Os melhores resultados podem ser alcançados se o gesso usado apresentar diâmetro das partículas inferior a 2 mm, pois à medida que se reduz o tamanho da partícula maior é sua velocidade de dissolução, mais íons de cálcio passa para a solução do solo e, conseqüentemente, há um aumento na concentração de eletrólitos e na capacidade de substituição do sódio no complexo de troca do solo.

A utilização de melhoradores que aumentam rapidamente a concentração de eletrólitos na solução do solo, tal como o $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, tem sido muito recomendado para correção de solo sódico. Soluções percolantes, com altas concentrações de eletrólitos, ricas em cálcio, aumentam a permeabilidade do solo, mas reduzem a eficiência de troca, ou seja, a percentagem de Ca^{2+} que substitui o Na^+ , isso devido a brusca redução da sodicidade do solo.

A eficiência do cálcio aplicado para remover o sódio adsorvido varia com a fração de sódio trocável. Ela é muito maior a alta valores de PST. A eficiência de troca de sódio em baixos níveis de sódio trocável inferior a 10 é baixa (em torno de 30%), por que uma parte da fração de cálcio aplicada desloca o magnésio trocável (Greene & Ford, 1985; Loveday,

1976). A eficiência pode também ser baixa (20 a 40%) em solos de textura fina, devido a lenta reação de troca Na/Ca no interior dos agregados estruturais (Manin *et al.*, 1982). Um fator raramente considerado é que a aplicação de grandes quantidades de gesso pode temporariamente reduzir a condutividade hidráulica devido o bloqueio dos poros do solo pelas partículas de gesso.

A solubilidade do gesso aumenta com a concentração salina (Bresler *et al.*, 1982; Keren e Shainberg, 1981; Durang, 1983), como mostra a Tabela 10.3. Tal corretivo tem se mostrado mais eficiente em solos com baixa PST, isso no que se refere as trocas iônicas Ca - Na, devido a liberação de eletrólitos mais lenta, constante e por um maior tempo para a solução do solo (Rhoades, 1982).

Tabela 10.3 Solubilidade do gesso em função da concentração salina.

Total de sais (meq ℓ^{-1})	Solubilidade do gesso (meq ℓ^{-1})
31	32
60	39
120	50
240	63
480	71

Quando o gesso é aplicado a doses equivalentes ao Na^+ trocável, e uniformemente misturado, ele é tão eficiente quando misturado com o CaCl_2 (Gupta & Singh, 1988). Segundo esses autores, as perdas de Ca^{2+} por lixiviação em colunas de solos após a aplicação superficial de CaCl_2 e a incorporação de CaCl_2 e gesso, revelou o seguinte resultado: CaCl_2 misturado > CaCl_2 superfície > CaSO_4 misturado + $\text{CaCl}_2 \cong \text{CaSO}_4$ misturado. A maior eficiência, a do gesso (misturado) comparado com o CaCl_2 foi devido a sua constante dissolução, além das trocas iônicas ocorrerem mais intensamente quando o fluxo de água passa através do volume de solo, já que o gesso não é todo removido juntamente com a frente de molhamento. Devido à alta solubilidade do CaCl_2 , sua aplicação superficial resulta numa elevada concentração de Ca^{2+} , que proporciona uma correção mais eficiente que quando misturado, mas em qualquer situação, seu efeito é menos pronunciado que o do gesso. Estudos experimentais (não publicados por Gupta & Singh) revelam eficiência de correção de 84, 71 e 59 %, respectivamente, para o gesso misturado, CaCl_2 superficial e a mistura dos dois. Keren & O'Connor (1982a) constataram uma eficiência de correção de 81 % para o gesso, aplicando-se um fluxo de água no solo de $1,16 \text{ cm ha}^{-1}$. Para o CaCl_2 a eficiência de recuperação do solo é menor, variando de 77 a 63 %.

É importante destacar que o gesso deve dissolver-se para efetuar a correção. Essa dissolução é função da velocidade do fluxo da água através do volume de solo (Keren & O'Connor, 1982b). O coeficiente de dissolução aumenta com a velocidade de fluxo, apesar de ocorrer redução do tempo de contato do corretivo com a solução. Deve-se buscar uma situação de equilíbrio. O resultado indica uma redução da taxa de dissolução do gesso para altas velocidades de fluxo de água. Então, sugere-se reduzir a velocidade da aplicação de água quanto possível, por exemplo, através da aplicação de irrigação por aspersão. Isso

aumenta a taxa de dissolução do gesso e aumenta a eficiência de permuta do cálcio pelo sódio no complexo de troca.

10.5.6 Culturas durante a recuperação

Um aspecto importante que deve ser considerado durante o planejamento para recuperação de áreas com problemas salinos refere-se a escolha de espécies que apresentam tolerância à salinidade e ou sodicidade para ser cultivada. É um fato relevante já que por mais eficiente que seja a técnica, o corretivo empregado e o sistema de lavagem utilizados para recuperar os solos salino-sódicos, encerrada toda a operação o solo tende a apresentar uma certa concentração de sais e de sódio, devido ao elevado poder tampão desses solos. Além disso, a utilização de tais solos, ao longo do tempo, provoca a solubilização de minerais que passam para a solução do solo, aumentando sua concentração salina. Esse processo é intensificado pela própria atividade bioclimática nas áreas de ocorrência desses solos no semi-árido.

As culturas apresentam tolerância variável aos sais solúveis e ao sódio. São várias as alterações existentes nas plantas para esse fim, entre as quais citam-se adaptações naturais representadas por aspectos morfológicos (maior suculência devido a presença de um grande parênquima paliádico), anatômicos (estrias de Caspary mais largas e segunda endoderme no córtex) e bioquímicas (produção de solutos orgânicos reguladores do gradiente osmótico no citoplasma ou vacúolo, por exemplo, sorbitol nas raízes e glicina betaína nas folhas). Mais detalhes sobre o efeito osmótico, de íons específicos e desbalanços nutricionais sobre as plantas cultivadas em solos salino e sódicos podem ser vistos nos Capítulos 2 e 4.

Uma das espécies mais cultivadas durante a recuperação de solos salino-sódicos é o arroz, por sua grande tolerância a sodicidade. Seu uso tem proporcionado aumento da permeabilidade do solo, o que é explicado pela ação física de suas raízes que facilitam o movimento da água (Chabra & Abrol, 1977), por causar redução no pH e no conteúdo de Na^+ trocável devido a solubilização de carbonatos (Gupta *et al.*, 1984).

Não apenas o efeito direto das plantas, mas também subsequente incorporação dos resíduos orgânicos em solos sódicos ou salino-sódicos influenciam sua correção química devido a produção de CO_2 , que mobiliza o carbonato de cálcio presente, o qual após dissociar-se em Ca^{2+} e CO_3^{2-} aumenta a neutralização do íon Na^+ .

Algumas práticas culturais, tais como aumento no número de sementes durante a semeadura, compensa a reduzida taxa de germinação e a alta mortalidade de plântulas no estágio inicial. Para o arroz, o transplântio de mudas mais velhas (com 40 a 50 dias de idade) toleram mais as condições salinas.

A implantação de espécies arbóreas constitui uma alternativa, já que por apresentar um sistema radicular profundo, aumenta a permeabilidade do solo sódico. Entre as espécies que tem apresentado resistência à salinidade, citam-se a algaroba (*Prosopis juliflora*), a leucena (*Leucaena leucocephala*) e a moringa (*Moringa oleífera*). Na realidade, poucos esforços tem sido feito para desenvolver pesquisas sobre a tolerância de espécies arbóreas em solos salino-sódicos.

Estudando o comportamento de várias espécies arbóreas em solo sódico, Shukla & Misra (1993) observaram que a algaroba foi a espécie que apresentou maior incremento quanto a altura e diâmetro no período considerado (Tabela 10.4).

Tabela 10.4 Performance de diferentes espécies de árvores desenvolvidas em solos sódicos.

Espécies	Altura/Diâmetro	Idade (meses)			
		6	12	18	24
Eucalyptus sp	altura	1,55	1,74	2,39	3,26
	diâmetro	0,68	1,44	2,03	3,98
Dalbergia	altura	0,61	1,35	1,89	2,81
	diâmetro	0,38	0,92	1,48	3,33
Acacia milotica	altura	0,84	1,45	2,01	2,54
	diâmetro	1,17	1,42	2,18	2,73
Prosopis juliflora	altura	0,89	1,76	2,72	4,16
	diâmetro	0,51	1,19	2,24	3,78

10.5.7 Cuidados pós-recuperação

Durante o período subsequente à recuperação do solo salino-sódico, deve-se tomar alguns cuidados a fim de que a boa estrutura do solo seja mantida. A aplicação de matéria orgânica ou gesso e a rotação de culturas na área são recomendáveis. Além disso, pode-se usar técnicas auxiliares para monitorar a área recuperada, quais sejam, aração profunda, subsolagem e inversão do perfil. A inundação prolongada destrói os agregados do solo e reduz a disponibilidade de N. A aspersão ou inundação intermitente geralmente causam menos destruição no solo. Entre outros cuidados pode-se citar: a) monitorar a área recuperada através de avaliações químicas e físicas do solo; b) empregar espécies tolerantes à salinidade e sodicidade no solo; c) associar práticas de correção, com simultâneo uso de corretivo e resíduo orgânico; d) atentar para a fertilidade do solo, já que o emprego de corretivo pode provocar desbalanços na proporção de nutrientes do solo, tais como, na relação Ca : Mg; e) observar o impacto ambiental do corretivo usado, através de avaliação dos mananciais de água potável que situam-se nas proximidades; f) manter a rede de drenagem sempre em perfeito estado, procurando conservar a profundidade inicial dos drenos; g) efetuar avaliações periódicas da água utilizada na correção do solo salino-sódico, para corrigir o volume de água aplicado, caso haja alteração na composição da mesma; h) avaliar se a produtividade da cultura é mantida ao longo do período pós-correção.

A recuperação de áreas salinas e sódicas, degradadas química e fisicamente, deve ter um início, meio e fim. O início corresponde a sensibilização não apenas dos técnicos e agricultores, mas também dos governos municipal, estadual e federal da importância do aproveitamento agrícola dessas áreas; o meio refere-se ao desenvolvimento e adoção de técnicas que venham eliminar o excesso de sais solúveis e de sódio trocável a um nível tal que as culturas possam ser estabelecidas; e o fim é que de fato o aumento na produção agrícola torne-se uma realidade em solos salino-sódicos. Desse modo, se estará

contribuindo para a resolução de um grave problema social, econômico e ambiental. Essa deve ser a meta dos profissionais da área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARMSTRONG, A.S.B. & TANTON, T.W. Gypsum applications to aggregated saline-sodic clay topsoils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 43 p. 249-260, 1992.
- AYERS, R. S. & WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Trad. Gheyi, H. R.; Medeiros de, J. F. & Damasceno, F. V. A., Campina Grande: UFPB, 1991. 218p. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29 Revisado 1.
- BERNSTEIN, I. **Salt Tolerance of plants**. USDA Information Bulletin 283, Washington, D.C., 1964.
- BINGHAM, F.T.; MARSH, A. W.; BRANSON, R.; MAHLER, R. & FERRY, G. Reclamation of salt-affected high boron soils in western Kern County. **Hilgardia**, v. 41 n.8, p.194-211, 1972.
- BRESLER, E.; McNEAL, B.L.; CARTER, D. L. Saline and sodic soils - Principles - Dynamics - Modeling. **Advances Series in Agricultural Science**, New York, 1982. 236 p.
- CARTER, D. L. & FANNING, C. D. Combining surface mulches and periodic water applicatons for reclaiming saline soils. **Soil Sci.Soc. Am. Proc.**, v. 28, p.564-567. 1964.
- CHAMCHAN, R.P.S. & CHAUCHAN, C.P.S. A modifications to schoonover's method of gypsum requirement determinations of soil. **Australian Journal of Soil Research**, Canberra, v. 17, p. 367 - 70, 1979.
- CHAUDHRY, G.H. & WARKENTIN, B.P. Studies on exchange of sodium from soils by leaching with calcium sulfate. **Soil Science**, Baltimore, v.105, n.3, p.191-197, 1968.
- CHAWLA, K.L. & ABROL, I.P. Effect of gypsum fineness on the reclamation of sodic soils. **Agriculte Water Manegement**, v. 5, p. 41 - 50. 1982.
- CHABRA, R. & ABROL, I.P. Reclaiming effect of rice grown in sodic soils. **Soil Science**, Baltimore, v.124, p.49-55, 1977.
- DOERING, E.J., L.C. BENS & G.T. REICHMAN. Shallow-water table concept for drainage desingn in semi-arid and sub-humid regions. **In: Proc. 4th Natl. Drainage Symp. Amer. Soc. Agric**, 1982, p. 42-49.
- DURANG, J.H. **Les sols irrigables - étude pedologique**. Paris: Press France, 1983. 352 p.
- EMERSON, W.W. Aggregate slaking and dispersion class, bulk properties of soil. **Australian Journal of Soil Research**, East Melbourne, v. 32, p.173-184, 1994.
- FASSBENDER, W.H. **Química de Suelos**. San José, Costa Rica: IICA, 1986. 398 p.
- GHEYI, H.R.; AZEVEDO, N.C. de; BATISTA, M.A.F.; SANTOS, J.G.P. dos. Comparação de métodos na recuperação de solo salino-sódico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 2, p. 173 - 178, 1995.
- GHUMAN, B.S.; VERMA, S.M. & PRIHAR, S.S. Effect of application rate, Initial soil wetness, and redistribution time on salt displacement by water. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, v.39, p.7-10, 1975.

- GREENE, R.S.B. & FORD, G.W. The effect of gypsum on cation exchange in two red duplex soils. **Australian Journal of Soil Research**, East Melbourne, v. 23, p.61-74, 1985.
- GUPTA, R. K. & ABROL, I. P. Salt-affected soils: their reclamation and management for crop production. **Adv. Soils Sci.**, v.11, p.223-288, 1990.
- GUPTA, R. K. & KHOSLA, B. K. Seasonal variations in salt and water content profiles in shallow and saline ground watertables. **Indian J. Agric. Sci.**, v.52, p.506-510, 1982.
- GUPTA, R.K.; BHUMBIA, D.K.; ABROL, I.P. Effect of sodicity pH, organic matter, and calcium carbonate on the dispersion behaviour of soils. **Soil Science**, Baltimore, v.137, n.4, p.245-251, 1984.
- HOFFMAN, G. J. & VAN GENUCHTEN, M. T. Soil properties and efficient water use: In: TAYLOR, H. M.; JORDAN, W. & SINCLAIR (Eds.). **Limitations to efficient water use in crop production**. American Society of Agronomy, 1983, p.73-85.
- HOFFMAN, G. J. Drainage required to manage salinity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.111, n.3, p.199-206, 1985.
- HOFFMAN, G. J. Guidelines for reclamation of salt-affected soils. **Appl. Agr. Res.**, v.1, p.65-72, 1986.
- JONES, S.B.; ROBBINS, C.W.; HANSEN, C.L. Sodic soil reclamation using cottage cheese (acid) whey. **Arid Soil Research and Rehabilitation**, Ottawa, v.7, n.1, p. 51-61, 1993.
- KELLER, J. & ALFARO, J. F. Effect of water application on leaching. **Soil Sci**, v.102, p. 107-114, 1966.
- KEREN, R. & BINGHAM, F.T. Boron in water, soil sand plants. In **Advances in soil sciences**, v.1. Springer-Verlag New York, Inc., New York, p.229-276, 1985.
- KEREN, R. & GAST, R. G. pH-dependent boron adsorption by montmorillonite hydroxy-aluminum complexes. **Soil Sci. Soc. Am. J., Madison**, v.47, p.1116-1121, 1983.
- KEREN, R. & O'CONNOR, G.A. "Effect of exchangeable ions and ionic strength on boron adsorption by montmorillonite and illite." **Clays and Clay Minerals**, v.30, p. 341-346, 1982a.
- KEREN, R. & O'CONNOR, G.A. "Gypsum dissolution and sodic soil reclamation as affected by water flow velocity." **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.46, p. 726 - 732, 1982b.
- KEREN, R. & SHAINBERG, I. Effect of dissolution rate on the efficiency of industrial and mined gypsum in improving infiltration of a sodic soil. **Soil Science Society of American Journal, Madison**, v. 45, p.103-107, 1981.
- KEREN, R.; SCHAINBERG, I.; FRENKEL, H.; KALO, Y. "The effect of exchangeable sodium and gypsum on surface runoff from loess soil." **Soil Science Society of American Journal**, v. 47, p.1001-1004, 1983.
- LOVEDAY, J. Relative significance of electrolyte and cation exchange effects when gypsum is applied to a sodic clay soil. **Australian Journal of Soil Research**, East Melbourne, v. 14, p.361-371, 1976.
- MAAS, E. V. & HOFFMAAN, G. J. Crop salt tolerance - current assessment. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.103, p. 115-134, 1977.
- MANIN, M.; PISSARRA, A.; VAN HORN, J.W. Drainage and desalinization of heavy clay soil in Portugal. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.5, p.227-240, 1982.

- MARTINEZ B., J. **Drenaje Agrícola**. Manual técnico N^o 5, Vol. I. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. NEOGRAFIS, S. L., Madrid. 1986, 239p.
- McKENZIE, D.C.; ABBOT, T.S.; ANTHONY, D.T.W.; HULME, P.J.; MacCLEOD, D.A.; HIGGINSON, F.R. Management of subsoil degradation in an Australian vertisol used for irrigated cotton production. **14h International Congress of Soil Science**, Kyoto, v. 6, p.76-181, 1990.
- McKENZIE, D.C.; ABBOT, T.S.; CHAN, K.I.; SLAVICH, P.G.; HALL, D.J.M. The nature, distribution and management of sodic soil in New South Wales. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 31, n. 6, p. 839-868, 1993.
- MILLER, R.J.; BIGGAR, J.W.; NIELSEN, D.R. "Chloride displacement in Panoche clay loam in relations to water movement and distribution." **Water Resour. Res.**, v.1 p. 63-73, 1965.
- MILLER, R.J.; BIGGAR, J.W. & NIELSEN, D.R. Chloride displacement in Panoche clay loam in relation to Water movement and distribution. **Water Resources Res.**, v.1, p.63-73, 1965.
- MIYAMOTO, S.; RYAN, J.; STROCHLEIN, J.L. Sulfuric acid and leaching requirents for reclaiming sodium affected calcarious soils. **Plant and Soil**, v. 43, p. 573-585, 1975.
- NIAZI, M.H.K.; HUSSAIN, N.; MEHDI, S.M.; RASHID, M.; KHAN, G.D. Efficacy of acid reclaimants in combination with nonconventional fertilizers for salinity control. In: **Proceedings of Sixth International Drainage Symposium**, Nashville 1992. p.387-394.
- OSTER, D. & FRENKEL, H. The chemistry of the reclamations of sodic soils with gypsum and lime. **Soil Science of American Journal**, Madison, v. 44, p. 444-447, 1980.
- OSTER, J. D. Irrigation with poor quality water. **Agricultural Water management**, v.25, p. 271-297. 1994.
- OSTER, J. D.; SHAINBERG, I. & ABROL, I.P. Reclamation of salt-affected soil. In: Agassi, M. (ed.), Marcel Dekker, Inc. New York: Soil Erosion Conservation and Rehabilitation. 1995, p.315-352.
- OSTER, J. D.; WILLARDSON, L. S. & HOFFMAAN, G. J. Sprinkling and ponding techniques for reclaiming saline soils. **Trans. ASAE**, v.15, p.1115-1117, 1972.
- OSTER, J.D.; SHAINBERG, I.; WOOD, J.D. Flocculation value and gel structure of sodium, calcium, montmorillonite and illite suspension. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, p.955-959, 1980.
- OVERSTREET, R.; MARTIN, J.C.; KING, H.M. Gypsum, sulfur, sulfuric acid for reclamation and alkali soil of the Fresno series. **Hilgardia**, v. 21, p.113-126, 1951.
- PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos**. Madrid, Editora Agrícola Española S. A., 1978. 520p.
- PRATTER, R.J.; GOERTZEN, J.O.; RHOADES, J.D.; FRENKEL, H. Efficient amendment use in sodic soil reclamation. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 42, p.782-786, 1978.
- RAHMAN, W.A. & ROWELL, D.L. The influence of magnesium in saline and sodic soils: A specific effect or a problem of cation exchange? **Journal of Soil Science**, Oxford, v.30, p.535-546, 1979.
- REEVE, R. C.; PILLSBURY, A. F. & WILCOX, L. V. Reclamation of saline and high boron soil in the Coachella Valley of California. **Hilgardia**, v. 24, p.69-91, 1955.

- RHOADES, J. & MERRIL, S. D. Assessing the suitability of water for irrigation: theoretical and empirical approaches. **FAO Soils Bulletin**, v.31, p.69-109, 1976.
- RHOADES, J.D. Drainage for salinity control. In VAN SCHILFGAARDE, J., (ed) **Drainage for agriculture**. Madison, Wisconsin, USA: Am. Soc. of Agronomy, 1974, p. 433-68. Agronomy 17.
- RHOADES, J.D. Soluble salts. In: PAGE, A.L. ed. **Methods of Soil Analysis**. part 2. Madison, SSSA, 1982. p.67-179.
- ROBBINS, C.W. Sodic calcareous soil reclamation as affected by different amendments and crops. **Agron. J.**, v.78, p.916-920, 1986.
- SANTOS, R.V. **Correção de um solo salino-sódico e absorção de nutrientes pelo feijoeiro vigna (*Vigna unguiculata* (L.) WALD)**. Piracicaba, 1995. 120p. Tese (Doutorado em solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo.
- SANTOS, R.V. dos; MURAOKA, T. Correção de um solo salino-sódico. I. Absorção de nutrientes pelo feijoeiro (*Vigna unguiculata*). In: **XXII Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas**, Manaus. 1996 (Resumo).
- SHAINBERG, I. & OSTER, J. D. **Quality of irrigation water**. Ottawa, Canada: International irrigation information Center, 1978. 65p.
- SHAINBERG, I.; KEREN, R.; FRENKEL, H. Response of sodic soils to gypsum and calcium chloride application. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 46, p.113-117, 1982.
- SHAINBERG, I.; SUMMER, M.E.; MILLER, W.P.; FARINA, M.P.W.; PAVAN, M.A.; FEY, M.V. Use of gypsum on soils: A review. **Advances in Soil Science**, New York, v. 9, p.1-111, 1989.
- SHALHEVET, J. Using water of marginal quality for crop production: major issues. **Agricultural Water Management**, v.25, p.233-269, 1994.
- SHUKLA, A.K. & MISRA, P.N. Improvement of sodic soil under tree cover. **The Indian Forester**, v.119, n.1, p.43-52, 1993.
- SIMS, J. R. & BINGHAM, F. T. Retention of boron by layer silicates, sesquioxides, and soil materials: III iron and aluminum-coated layer silicates and soil materials. **Proc. Soil Sci. Soc. Am.**, Madison, v.32, p.369-373, 1968.
- SINGH, M. Distribution of boron in relations to soil properties. **J. Indian Soc. Soil Sci.** v.18, p.141-146, 1970.
- VAN SCHILFGAARDE, J. **Drainage design for salinity control**. In: SHAINBERG AND J. SHALHEVET (eds.), Soil salinity under irrigation, processes and management. Berlin: Springer-Verlag, 1984, p.190-197.
- VAN SCHILFGAARDE, J.; BERNSTEIN, L.; RHOADES, J. D. & RAWLINS, S. L. Irrigation management for salt control. **Journal and the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, v.100, p.321-38, 1974.
- HIA, T.A.; MIYAMOTO, S.; STROEHLEIN, J.L. Effect of surface applied sulfuric acid on water penetration into dry calcareous and sodic soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.39, p.1201-1204, 1975.