

4 EFEITOS DE SAIS NO SOLO E NA PLANTA

Luiz Antônio Lima

4.1 INTRODUÇÃO

Dados apresentados no Capítulo 1 permitem concluir que de toda a área irrigada no mundo, cerca de 13% encontra-se danificada por sais. Este capítulo apresenta como esses sais podem alterar o comportamento do solo e das plantas. É importante esclarecer que os sais podem estar presentes no solo como consequência de muitos processos, entre os quais aqueles que ocorreram durante a formação do solo, como resultado da irrigação com água salina ou mesmo consequência de inundações naturais, como ocorrem em várzeas amazônicas, marginais aos rios que sofrem intrusão de água salina causada pela preamar (Lima & Tourinho, 1996).

A maioria dos solos afetados por sais ocorre em regiões de clima árido ou semi-árido, onde a evapotranspiração tende a superar as chuvas. Consequentemente, não há percolação de chuva natural através do perfil do solo, capaz de lavar os sais.

O efeito dos sais sobre o solo ocorre basicamente pela interação eletroquímica existente entre os sais e a argila. A intensidade deste fenômeno depende da natureza da argila e do cátion presente. A característica principal deste efeito é a expansão da argila quando umidecida e a contração quando a água é evaporada ou retirada pelas plantas. Se a expansão for exagerada pode ocorrer a fragmentação das partículas provocando a dispersão da argila. De modo generalizado, altera-se o volume ocupado pela argila, reduzindo o tamanho dos poros e modificando a estrutura do solo, afetando significativamente suas propriedades físicas.

Os efeitos dos sais sobre plantas podem ser causados pelas dificuldades de absorção de água salina pela planta, pela interferência dos sais nos processos fisiológicos, ou mesmo por toxidez similares àquelas de adubações excessivas.

Para entender como esses efeitos ocorrem, é preciso conhecer todos os fenômenos envolvidos. Para isto, o texto a seguir trata primeiramente as interações dos sais com o solo e posteriormente com a planta.

4.2 EFEITOS DOS SAIS SOBRE O SOLO

4.2.1 *Natureza e estrutura das principais argilas*

A argila, predominante em solos de regiões de clima árido ou semi-árido, pertence em geral, ao grupo dos silicatos, pois o outro grupo, dos óxidos, ocorre com maior frequência em regiões de intemperismo acentuado, onde houve processos de percolação em abundância durante a formação do solo. Em regiões de clima árido ou semi-árido, menos intemperizadas, a argila, do grupo dos silicatos, pode pertencer ao sub-grupo das smectitas, das micas ou das caulinitas. Montmorilonita, Illita e Caulinita são, respectivamente, exemplos desses três sub-grupos.

As propriedades coloidais das argilas dependem da área específica (metros quadrados por grama) que, por sua vez, depende do tamanho e formato das argilas. Por

exemplo, enquanto cada grama de caulinita possui 30 m² de área, a montmorilonita apresenta cerca de 750 m², evidenciando maior espaço para interação eletroquímica com os cátions em solução.

Para entender a diferença existente entre esses três sub-grupos, devemos destacar que duas unidades estruturais existem na maioria das argilas. Uma unidade consiste do arranjo de átomos de silício com oxigênio em formato tetrahédrico, constituindo uma lâmina de sílica. A outra unidade consiste do arranjo de átomos de alumínio, ferro ou magnésio com hidroxilas em formato octahédrico, formando uma lâmina de alumina (Shainberg & Letey, 1984). Argilas do tipo 1:1, como caulinita, consistem de uma lâmina de sílica e outra de alumina. As duas lâminas são unidas por átomos de oxigênio, compartilhados por ambas as lâminas, formando uma camada de argila. As camadas formadas são unidas entre si por ligações de hidrogênio muito fortes, não permitindo a separação das mesmas por uma possível intrusão de moléculas de água (Figura 4.1).

Argilas do tipo 2:1, consistem de uma lâmina de alumina entre duas de sílica, unidas por átomos de oxigênio das duas lâminas de sílica que também são compartilhados pela lâmina central de alumina. Os átomos de oxigênio, externos das camadas formadas, oferecem ligações fracas entre as camadas permitindo que a argila possa expandir, ou seja, permitindo a fácil separação das camadas pela intrusão de água ou mesmo de cátions que quando hidratados aumentam de tamanho, como por exemplo o sódio na montmorilonita (Figura 4.2).

Embora a illita também seja uma argila do tipo 2:1, suas camadas não distanciam-se entre si, porque são fortemente unidas por íons potássio que encaixam-se perfeitamente nas aberturas hexagonais dos grupos de oxigênio das lâminas de sílica, colocando-se numa forma não intercambiável (Figura 4.3).

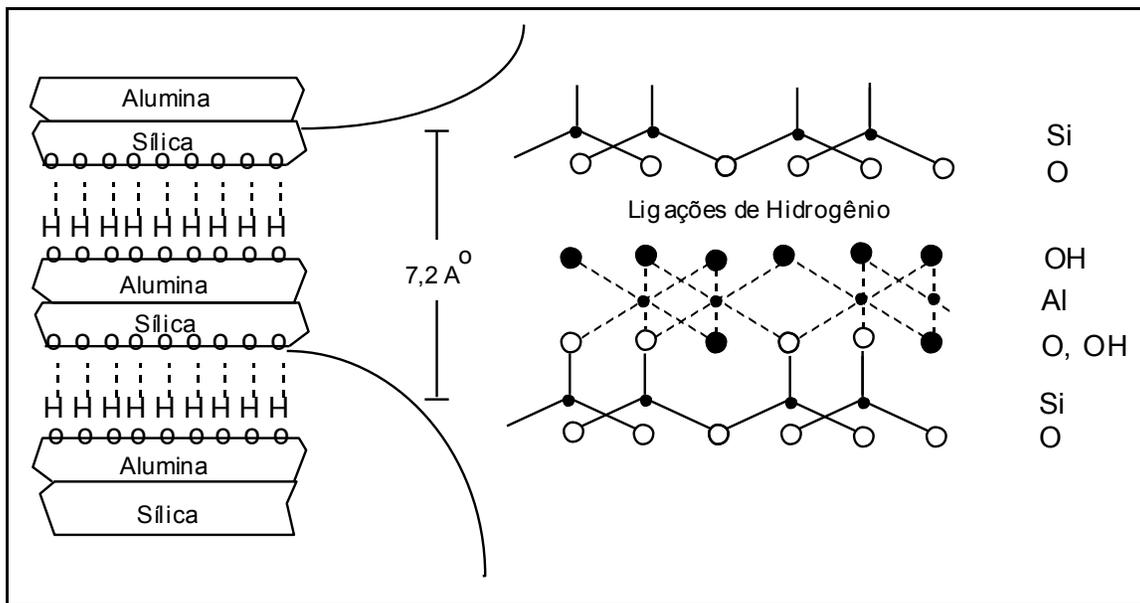


Figura 4.1 Esquema estrutural da argila do grupo caulinita (adaptado de Bohn *et al.*, 1979).

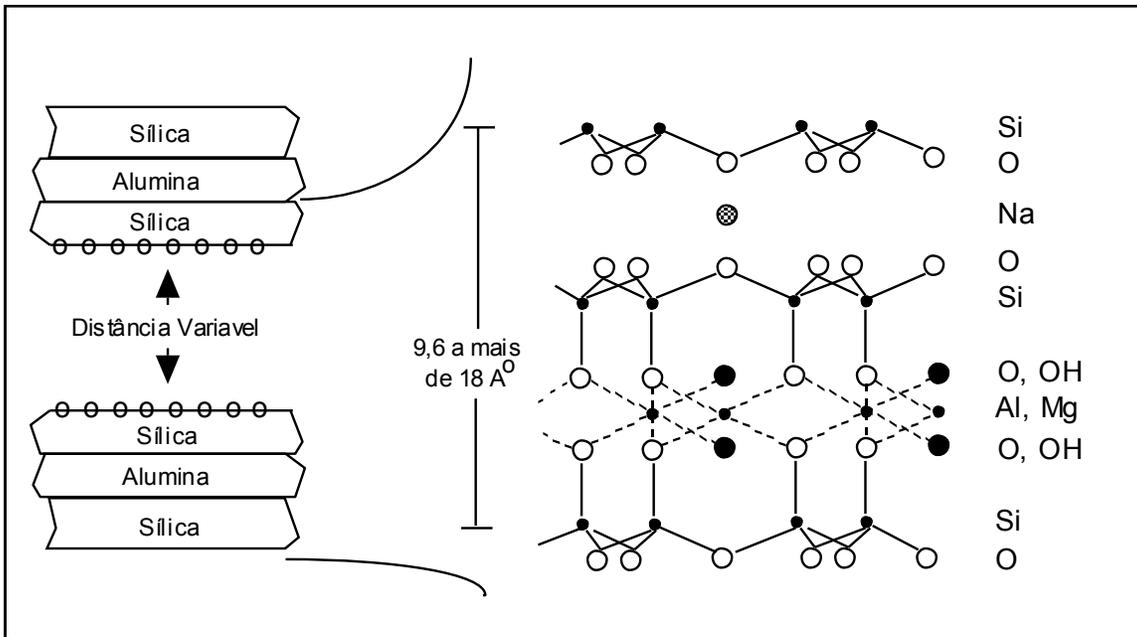


Figura 4.2 Esquema estrutural da argila montmorilonita (adaptado de Bohn *et al.*, 1979).

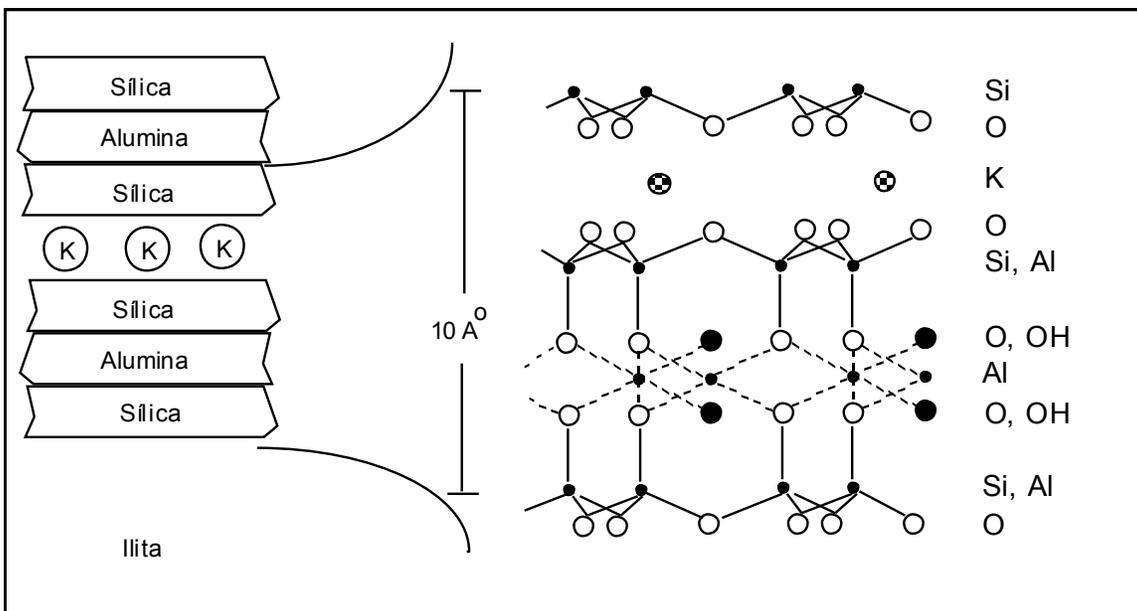


Figura 4.3 Esquema estrutural da mica (adaptado de Bohn *et al.*, 1979).

4.2.2 Características dos íons

Os íons diferem entre si em tamanho e em várias outras propriedades, como por exemplo, em valência. Essas considerações são muito importantes, pois a interação com a argila depende das características dos íons presentes no solo.

Curiosamente, quanto menor o íon, maior a capacidade de atrair moléculas de água e detê-las por fracas ligações, hidratando-se. Por isso, enquanto o potássio aumenta seu diâmetro de 2,66 para 10,64 Å ao hidratar-se, o sódio hidrata-se de 1,96 até atingir o diâmetro de 15,80 Å (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 Diâmetro iônico (Å).

Ion	Diâmetro não hidratado	Diâmetro hidratado
Lítio	1,56	20,06
Sódio	1,96	15,80
Potássio	2,66	10,64
Cálcio	2,12	19,20
Magnésio	1,56	21,60

Esta camada de hidratação que existe ao redor do íon faz com que sua interação com outras cargas elétricas seja menor pois haverá uma maior distância entre as cargas. Este fenômeno pode ser explicado pela lei de Coulomb que estabelece que a força de atração entre cargas opostas (positiva e negativa) é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as cargas.

A mesma lei estabelece também que quanto maior a carga, maior a força de atração. Por isso, cátions bi-valentes são atraídos à argila com maior força eletrostática que os monovalentes. Por essa razão, percebe-se que a força eletrostática dos bi-valentes, sendo atraídos à argila, supera até mesmo o efeito da hidratação diminuindo a distância entre cargas negativas da argila e a carga positiva do cátion. De fato, muitos cientistas designam este efeito da hidratação, capaz de aumentar a distância entre cargas, e consequentemente reduzir a força eletrostática, de força de hidratação. Assim, pode-se concluir que a força de hidratação é superada com mais facilidade pelos bi-valentes, fazendo com que cálcio e magnésio sejam mais atraídos à argila do que, por exemplo, o sódio.

Em conclusão, as placas de argila possuem ao seu redor íons, principalmente cátions, já que de maneira geral as argilas têm carga predominantemente negativa. A camada de íons existentes ao redor da argila tem espessura menor quando predominam cátions bi-valentes (Ca e Mg) ou mesmo trivalentes como o alumínio.

Outra força pode, entretanto, alterar a espessura desta camada iônica. Trata-se da força de difusão, pois sabe-se que, caso a solução, distante da placa de argila, apresente baixa concentração de íons, os íons na camada iônica tendem a se moverem para distante da placa de argila, por diferença de concentração (difusão). Por essa razão, muitos cientistas preferem designar esta camada de íons como camada difusa. Maiores detalhes podem ser vistos no Capítulo 2.

4.2.3 *Interação dos cátions com a argila*

Do texto anterior (item 4.2.2), pode-se deduzir que a camada difusa de íons juntos às argilas com muito sódio e com presença de poucos íons em solução (solo irrigado com água isenta de sais), apresenta espessura relativamente maior. Pode-se deduzir também que duas camadas de íons pode ser caracterizada ao redor da argila. Uma delas, logo adjacente à argila, é atraída com grande força eletrostática e tem sido designada como camada Stern, em homenagem ao cientista que aperfeiçoou a teoria de Gouy-Chapman sobre a camada iônica difusa que ocorre ao redor das placas de argila. A outra camada é formada por íons positivos que também são atraídos pela carga negativa da argila. Esta camada é especificamente designada como camada difusa. Pela ocorrência de duas camadas distintas, é que o espaço adjacente às placas de argila é designado na literatura como camada dupla difusa.

Conclui-se também que sempre poderá haver, ao lado de uma placa de argila, outra placa de argila. Assim, quanto maior a espessura da dupla camada iônica, maior será a distância entre placas e, conseqüentemente, maior será o volume ocupado pela argila.

O afastamento das placas só ocorre, entretanto, em argilas com fracas ligações entre placas como é o caso da montmorilonita. Deve-se lembrar também que este afastamento, designado como expansão, pode ocorrer com a presença de água isenta de sais e principalmente se junto à argila houver sódio. Sabe-se também que se a expansão for exagerada poderá ocorrer a separação definitiva das placas, fenômeno designado como dispersão química. Para montmorilonita, a dispersão ocorre se a distância entre placas ultrapassa 40 Å. Este fenômeno, associado à dispersão mecânica, causam turbidez em águas naturais (Biggar, 1984). Cabe lembrar também que enquanto a expansão é essencialmente reversível, a dispersão é um processo que permite translocação de argila e formação de crostas.

É interessante notar que a ausência de íons na água provoca o aumento da espessura da camada iônica mesmo se não houver sódio presente na fase trocável. É assim que solos, com baixa percentagem de sódio na fase trocável, também apresentam expansão se forem irrigados com água contendo poucos sais. Este fenômeno ocorre com a montmorilonita, mesmo que não haja sódio, sempre que a condutividade elétrica (CE) da água atingir níveis inferiores a 0,2 dS m⁻¹ (FAO, 1976).

É curioso observar que os solos argilosos da região de Juazeiro - Bahia, as vezes contém montmorilonita e são irrigados com água do rio São Francisco (CE = 0,1 dS m⁻¹) ou mesmo com água de chuvas (CE < 0,05 dS m⁻¹). Certamente ocorrem nesses solos expansão da argila ao ser molhada e contração a medida que o solo seca. Esses e outros fatos serão discutidos ainda neste capítulo.

Ao contrário do sódio, se na montmorilonita predominar cálcio (íon bi-valente), haverá forte ligação entre este cátion e a argila, decrescendo a espessura da camada iônica o que une fortemente as placas, antes separadas, promovendo o inverso da dispersão que pode ser designado como coagulação. As partículas coaguladas podem chocarem-se umas com as outras unindo-se num processo designado por floculação (Ravina, 1993).

Partículas de argila também podem se juntar por agregação. A agregação pode ocorrer com a presença de matéria orgânica ou com a presença de substâncias poliméricas. Essas substâncias são classificadas pelo tipo de monômero presente e pelo peso molecular que determina o comprimento da cadeia linear de monômeros. Em solução, o comprimento

pode atingir até 3 milhões de Å, enquanto o diâmetro permanece de 5 a 10 Å (Schamp *et al.*, 1975), formando uma espécie de espaguete capaz de unir partículas de argila.

De fato, experimentos conduzidos nos Estados Unidos por Trout *et al.* (1994), demonstram que até 95% das partículas carregadas pela água em sulcos de irrigação podem ser agregadas com emprego de poliacrilamidas (2 kg ha⁻¹) para evitar erosão. Esses compostos, com moléculas longas e de alto peso molecular e capazes de unir fragmentos de partículas de argila anteriormente dispersas em filamentos, evitam por exemplo a turbidez da água em sulcos de irrigação. Maiores detalhes do emprego desses materiais podem ser vistos em trabalhos publicados por Terry & Nelson (1986) e Ravina (1993).

É possível concluir, assim, que solos contendo argila do grupo dos silicatos, especialmente do sub-grupo das smectitas, como montmorilonita, não devem ser irrigados com água contendo sódio ou que contenha concentração de sais inferior a 120 ppm. Para estabelecer critérios de qualidade de água em relação ao sódio, o Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos, em analogia com a equação de Gapon, estabeleceu em 1954 o parâmetro Razão de Adsorção de Sódio (RAS), conforme já definido no capítulo 2 (item 2.2).

Mais tarde, em 1961, Antipov-Karataev & Kader (citados por Rabochev, 1979) propuseram que água com fator de troca iônica (K), expresso conforme a Equação 4.1, inferior a 1 é inadequada para irrigação.

$$K = \frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{Na^{+} + 0,23TSD} \quad (4.1)$$

onde as concentrações são expressas em meq ℓ⁻¹ e TSD refere-se ao total de sais dissolvidos em mg ℓ⁻¹ ou ppm.

Smedema & Rycroft (1983) sugeriram, com base em dados publicados pela FAO (1976), os critérios listados na Tabela 4.2. Nessa tabela, o cálculo do parâmetro RAS_a envolve o termo pH_c, expresso através da Equação 4.2, o qual se refere ao pH teórico que a água alcançaria se estivesse em equilíbrio químico com CaCO₃.

$$pH_c = (pK_2 - pK_s) + p(Ca + Mg) + pAlc \quad (4.2)$$

Cada termo da Equação 4.2 pode ser estimado separadamente pelas seguintes equações:

$$pK_2 - pK_s = 2,026 + 05092 \left[\frac{0,45\sqrt{CE}}{1 + 0,225\sqrt{CE}} + \frac{0,113\sqrt{CE}}{1 + 0,163\sqrt{CE}} \right] \quad (4.3)$$

$$p(Ca + Mg) = 3,3 - \log(Ca + Mg) \quad (4.4)$$

$$p(Alc) = 3,0 - \log(HCO_3 + CO_3) \quad (4.5)$$

onde as concentrações são expressas em $\text{meq } \ell^{-1}$ e a condutividade elétrica (CE) em dS m^{-1} . A diferença entre o pH medido na água e o pH calculado pelas equações acima é definida como Índice de Saturação ou Índice de Langelier e permite predizer, toda vez que o índice for positivo, que haverá formação de precipitados de carbonato de cálcio.

Tabela 4.2 Critérios de qualidade de água para privisão de efeitos sobre infiltração de água no solo.

Risco	Parâmetro	Critério		
		sem efeito	efeito moderado	efeito severo
Sodicidade (problemas de infiltração)	CE (dS m^{-1})	> 0,5	0,2 a 0,5	< 0,2
	RASa (montmorilonita)	< 6	6 a 9	> 9
	RASa (ilita ou vermiculita)	< 8	8 a 16	> 16
	RASa (caulinita e sesquióxidos)	< 16	16 a 24	> 24

$\text{RAS}_a = \text{RAS} [1 + (8.4 - \text{pH}_c)]$

Ayers & Tanji (1981) propuseram os critérios apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Critérios de qualidade para interação dos sais com a estrutura da argila.

RAS	CE (dS m^{-1})		
	sem efeito	efeito moderado	efeito severo
0 a 3	> 0,9	0,9 a 0,2	< 0,2
3 a 6	> 1,3	1,3 a 0,25	< 0,25
6 a 12	> 2,0	2,0 a 0,35	< 0,35
12 a 20	> 3,1	3,1 a 0,9	< 0,9
>20	> 5,6	5.6 a 1,8	< 1,8

Percebemos, assim, que pela mesma razão que a água não deve conter muito sódio o solo também não. É assim que técnicos designam como solos sódicos aqueles cuja percentagem de sódio trocável (PST) é maior que 15. Cabe esclarecer que encontra-se na literatura vários trabalhos que demonstram efeitos do sódio sobre a estrutura do solo, mesmo sob níveis de PST inferiores a 15. Assim, parece ser mais prudente considerar como sódicos, solos com $\text{PST} > 7$.

Percebe-se, então, que a adição de cálcio ao solo é uma prática eficaz para substituir o sódio. De fato, um dos produtos mais empregados para recuperação de solos é o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A recuperação de solos sódicos é um assunto abordado no capítulo 10. Cabe ressaltar, entretanto, que o uso do gesso em solos posteriormente irrigados com água contendo carbonato de sódio pode, segundo Minashina (1979), proporcionar a formação de uma camada de calcita ao redor do gesso, tornando-o ainda menos solúvel.

Pode-se concluir finalmente que a salinidade (alta concentração de sais) não altera a estrutura do solo com argilas expansivas, mas sim a baixa concentração de sais ($\text{CE} < 0,2 \text{ dS m}^{-1}$) e/ou a alta concentração de sódio.

4.2.4 Alteração dos parâmetros físico-hídricos do solo

Densidade aparente

A contração das partículas de argila com a redução da umidade do solo pode ser caracterizada pela curva de encolhimento que relaciona o volume ocupado pelo solo com a umidade. Lima & Grismer (1994) observaram que solos sódicos encolhem-se mais acentuadamente com a redução da umidade do que solos normais, apresentando densidade aparente maior, provavelmente como consequência da desestruturação do solo que elimina os poros. As diferenças notadas no encolhimento dos solos permitiram observar, através de análise computadorizada de imagens, que solos normais apresentam, quando secos, cerca de 8% de sua superfície aberta na forma de fendas, enquanto nos solos sódicos esta área varia de 15 a 20% (Lima & Grismer, 1992,1994). Conclui-se, assim, que solos sódicos apresentam, quando secos, maior densidade aparente.

Retenção de água no solo

Os solos, cuja estrutura foi modificada pela sodicidade e/ou ausência de íons em solução, tendem a armazenar mais água quando expostos aos mesmos níveis de potencial mátricial (Russo & Bresler, 1980). As alterações na curva característica de água do solo são maiores para níveis de umidade próximos da saturação, podendo ocorrer mesmo sob baixos níveis de potencial como 1,5 MPa. Lima *et al.* (1990) estudaram os efeitos da sodicidade e da concentração de sais sobre as curvas características de um solo argiloso e também observaram aumento da umidade retida quando o solo era exposto a maior concentração de sódio na fase trocável e/ou menor concentração de sais em solução. Após ajustarem os dados obtidos à equação de Van Genuchten (1980), conforme a equação 4.6, observaram que a sodicidade reduz o valor do parâmetro α (alfa), enquanto aumenta os valores de n e m .

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (4.6)$$

onde θ é a umidade volumétrica, h é o potencial mátricial e os subscritos r e s correspondem, respectivamente, aos níveis de umidade residual e de saturação.

Recentemente, Crescimanno & Iovino (1994) observaram as mesmas tendências para os parâmetros acima quando submetidos à sodicidade e/ou baixa concentração de íons em solução.

Dinâmica da água no solo

Como pode ser esperado, a baixa concentração de íons em solução e/ou a alta percentagem de sódio trocável diminuem o tamanho dos poros, alterando, portanto, o movimento de água no solo. Sabe-se também que o fluxo de água (q) depende da condutividade hidráulica (K) ou da difusividade (D), podendo ser expresso na forma de gradiente de potencial ($d\phi$) ou de umidade ($d\theta$) pelas Equações 4.7 e 4.8, respectivamente.

$$q = -K(\phi) \frac{d\phi}{dz} \quad (4.7)$$

$$q = -D(\theta) \frac{d\theta}{dz} \quad (4.8)$$

onde z é a coordenada vertical.

Os efeitos da salinidade sobre o fluxo de água no solo podem ser previstos pela análise desses efeitos sobre a $K(\phi)$ ou a $D(\theta)$.

Em geral, a condutividade ou a difusividade hidráulica diminuem com a redução da concentração iônica da solução do solo e/ou com o aumento da sodicidade, sendo essas alterações mais significativas para valores mais acentuados de umidade. Este fato, detectado por Russo & Bresler (1977), foi confirmado também por Lima *et al.* (1990) e Crescimanno & Iovino (1994). Deduz-se também que as maiores reduções nesses parâmetros ocorrem próximas da saturação porque os macroporos são grandemente alterados pela salinidade.

A alteração da dinâmica da água no solo pelos sais também pode ocorrer através da redução da condutividade hidráulica da camada superficial. Comumente analisado através da infiltração, este efeito foi estudado por Oster & Schroer (1979) que revelaram que a composição química da água pode ser mais importante que a sodicidade do solo. Os autores perceberam que a ausência de sais na água altera significativamente a taxa de infiltração de água no solo. Mais tarde, Agassi *et al.* (1981) perceberam a ocorrência de dispersão de argila presente na camada superficial quando aplicou-se água destilada, muito embora o teor de sódio trocável tenha sido mantido abaixo de 5%. Keren *et al.* (1983) também apontaram o fato de que a irrigação com água salina e sódica em Israel traz efeitos sobre a infiltração de água no solo, pois durante a estação chuvosa a água que se infiltra é relativamente isenta de sais e o solo ainda contém sódio proveniente da irrigação com água salobra na estação seca, favorecendo a formação de crostas superficiais. Fenômeno similar ocorre no vale central da Califórnia, quando a chuva proporciona a formação de crostas em solos sódicos, dificultando a emergência das plântulas de algodão, recém-germinadas.

Módulo de ruptura do solo

O comportamento do solo, em relação às práticas de mecanização ou até mesmo ao fendilhamento, depende do módulo de ruptura que por sua vez depende da umidade do solo e da salinidade. Uma análise dos dados publicados por Reeve *et al.* (1954) permite concluir que o módulo de ruptura aumenta linearmente com o aumento da percentagem de sódio trocável presente no solo. Este fato implica que o esforço para deformar um solo com alta PST é maior do que no mesmo solo livre de sódio trocável. Isto explica porque os torrões de solos afetados por sódio são mais difíceis de serem quebrados por implementos agrícolas.

4.3 EFEITOS DO SAIS SOBRE AS PLANTAS

4.3.1 Mecanismo de tolerância das plantas à salinidade

As plantas tolerantes à salinidade são designadas como plantas halófitas e podem necessitar até cerca de $15 \text{ g } \ell^{-1}$ de cloreto de sódio, equivalente à metade da concentração da água do mar, para completar seu ciclo fenológico. Essas plantas absorvem, por exemplo, o cloreto de sódio em altas taxas e o acumulam em suas folhas para estabelecer um equilíbrio osmótico com o baixo potencial da água presente no solo. Este ajuste osmótico se dá com o acúmulo dos íons absorvidos nos vacúolos das células das folhas, mantendo a concentração salina no citoplasma e nas organelas em baixos níveis de modo que não haja interferência com os mecanismos enzimáticos e metabólicos e com a hidratação de proteínas das células. Esta compartimentação do sal é que permite, segundo Lauchi & Epstein (1984), às plantas halófitas viverem em ambiente salino.

Para esse ajuste osmótico, na membrana que separa o citoplasma e o vacúolo não há fluxo de um compartimento para outro, mesmo que haja elevado gradiente de concentração. O ajuste osmótico é obtido por substâncias compatíveis com as enzimas e os metabólitos ali presentes. Esses solutos são, na maioria, orgânicos como compostos nitrogenados e, em algumas plantas, açúcares como o sorbitol (Lauchi & Epstein, 1984).

As plantas sensíveis à salinidade tendem, em geral, a excluir os sais na absorção da solução do solo mas não são capazes de realizar o ajuste osmótico descrito e sofrem com decréscimo de turgor, levando as plantas ao estresse hídrico por osmose. Embora o crescimento da parte aérea das plantas se reduza com o aumento da concentração salina do substrato onde vivem, a redução da absorção de água não é necessariamente a causa principal do reduzido crescimento das plantas em ambientes salinos. De fato, Kramer (1983) aponta que plantas que crescem em substratos salinos mantêm seu turgor e chama atenção para o fato de que suculência é uma característica comum entre as halófitas. Este fato sugere que essas plantas não percam água por salinidade como se estivessem em solos secos e também não recuperem-se, como fazem as plantas estressadas por falta de água, ao receberem água novamente. Assim, parece que o efeito no crescimento, de níveis similares de potencial osmótico e mátrico, é diferente. Esta inferência permite questionar o emprego da soma algébrica com a mesma ponderação para potencial gravitacional, matricial e osmótico ao calcular o potencial total da água no solo.

Tem sido muito comum estimar o potencial osmótico (atm), multiplicando-se a condutividade elétrica (dS m^{-1}) por 0,36. Esta transformação foi sugerida pelo corpo técnico do Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (Richards, 1954), com base em dados obtidos por Campbell *et al.* (1949). É interessante ressaltar que a predominância de um sal na água de irrigação pode requerer outra constante de multiplicação para estimativa do potencial osmótico. Dados publicados pelo mesmo Laboratório permitem deduzir que as constantes sejam 0,29; 0,30; 0,32 ou 0,38, respectivamente, para os sais sulfato de magnésio, cloreto de cálcio ou magnésio, sulfato de sódio e cloreto de sódio. A contribuição dos sais em solução para o potencial total é bastante significativa e cabe lembrar que a necessidade de aumentar a produtividade, têm requerido altas dosagens de adubação de cobertura, como por exemplo, em plantios de banana na região norte de Minas Gerais. É preciso lembrar que essas adubações tornam o potencial osmótico numa componente importante e não possa ser jamais desprezado na estimativa do potencial total.

Plantas muito sensíveis à salinidade também absorvem água do solo juntamente com os sais permitindo que haja toxidez na planta por excesso de sal absorvido. Este excesso promove desbalanceamentos no citoplasma resultando em danos principalmente na bordadura e no ápice das folhas, a partir de onde a planta perde, por transpiração, quase que

tão somente água, havendo nestas regiões acúmulo do sal translocado do solo para a planta, e obviamente intensa toxidez de sais.

Como os mecanismos citados acima são geneticamente transferidos, a expectativa é, segundo Valentine (1984), que os gens responsáveis pela tolerância à salinidade (gens OSM) possam ser manipulados de modo a tornar as plantas menos sensíveis à salinidade. Bons indícios provém do fato de que já é possível obter bactérias com tolerância osmótica.

Os sais também podem apresentar toxidez específica originada de alguns íons como por exemplo cloreto, boro e sódio. Sousa (1995) observou que o feijoeiro apresenta danos maiores quando irrigado com altos níveis de cloreto de sódio comparado ao cloreto de cálcio. Também há diferenças entre cloreto e sulfato. Por exemplo, sabe-se que algumas plantas crescem menos quando sujeitas a níveis de sulfato do que aos mesmos níveis de cloreto. Alguns autores citados por Kramer (1983) também citam que o cloreto aumenta a suculência das plantas, enquanto o sulfato diminui.

4.3.2 Tolerância das plantas à salinidade

Existem na literatura muitas tabelas de tolerância das plantas à salinidade, expressando o efeito generalizado de sais sobre as plantas. Entre estas, pode-se destacar os dados publicados por Berstein (1974), Maas & Hoffman (1977), Ayers (1977), Bresler *et al.* (1982), Maas (1984), e Ayers & Westcot (1991). Alguns valores extraídos dessas publicações são listados na Tabela 4.3.

Como pode ser observado, a Tabela 4.3 não traz algumas das plantas de interesse para produtores e técnicos brasileiros, como por exemplo café, abacaxi, banana, etc. Observações no desenvolvimento da banana na região norte de Minas Gerais revelam, entretanto, que a condutividade elétrica do extrato saturado para banana cultivar pacovan não deve exceder 2 dS m^{-1} . Entretanto, como nessa cultura irrigada cada planta produz somente um cacho de banana em cerca de doze meses após o plantio da muda, sendo cortada na colheita do cacho, os efeitos salinos não se acumulam a ponto de prejudicarem drasticamente a produtividade, o número de pencas ou o tamanho do cacho. Deduz-se que esforços em pesquisa são extremamente necessários para testar a tolerância à salinidade, das plantas de interesse aos produtores brasileiros.

Finalmente, encontram-se na Tabela 4.4 os limites de salinidade para algumas flores, publicados no “Proceedings of the American Society for Horticultural Science”, compilados por Farnham *et. al.* (1979).

Tabela 4.3 Valores limites de condutividade elétrica do extrato saturado do solo para evitar efeitos generalizados no desenvolvimento das plantas.

Nome	nome científico	CEes (dS m ⁻¹)
abacate	<i>persea americana</i>	1,3
abobrinha	<i>cucumis sativus</i>	2,5
abobrinha	<i>cucurbita pepo melopepo</i>	3,2
abobrinha italiana	<i>cucurbita pepo melopepo</i>	4,7
aipo, salsão	<i>apium graveolens</i>	1,8
alface	<i>lactuca sativa</i>	1,3
alfafa	<i>medicago sativa</i>	2,0
algodoeiro	<i>gossypium hirsutum</i>	7,7
ameixa	<i>prunus domestica</i>	1,5
amêndoa	<i>prunus dulcis</i>	1,5
amendoim	<i>arachis hypogaea</i>	3,2
amoreira	<i>rubus ursinus</i>	1,5
amoreira preta	<i>rubus spp,</i>	1,5
arroz	<i>oryza sativa</i>	3,0
azeitona	<i>olea europaea</i>	2,7
azevém	<i>lolium perenne</i>	5,6
batata	<i>solanum tuberosum</i>	1,7
batata doce	<i>ipomoea batatas</i>	1,5
beterraba	<i>beta vulgaris</i>	4,0
beterraba açucareira	<i>beta vulgaris</i>	7,0
brócolis	<i>brassica oleraceae botrytis</i>	2,8
cana de açúcar	<i>saccharum officinarum</i>	1,7
capim bermuda	<i>cynodon dactylon</i>	6,9
capim doce	<i>phalaris tuberosa</i>	4,6
capim dos pomares	<i>dactylis gromerata</i>	1,5
capim mimoso	<i>eragrostis spp,</i>	2,0
capim sudão	<i>sorghum sudanense</i>	2,8
cártamo	<i>carthamus tinctorius</i>	5,3
caupi	<i>vigna unguiculata</i>	1,3
cebola	<i>allium cepa</i>	1,2
cenoura	<i>daucus carota</i>	1,0
cevada (forragem)	<i>hordeum vulgare</i>	6,0
cevada (grão)	<i>hordeum vulgare</i>	8,0
cornichão	<i>lotus uliginosus</i>	2,3

Nome	nome científico	CE es (dS m ⁻¹)
couve-flor	<i>brassica oleracea</i>	2,5
damasqueiro	<i>prunus armeniaca</i>	1,6
elimo	<i>elymus triticoides</i>	2,7
ervilha	<i>pisum sativum L.</i>	2,5
espinafre	<i>spinacia oleracea</i>	2,0
feijão fava	<i>vicia faba</i>	1,6
feijoeiro	<i>phaseolus vulgaris</i>	1,0
festuca	<i>festuca elatior</i>	3,9
figo	<i>ficus carica</i>	2,5
framboesa	<i>rubus idaeus</i>	1,0
laranja	<i>citrus sinensis</i>	1,7
limão	<i>citrus limon</i>	1,7
linho	<i>linum usitatissimum</i>	1,7
maçã	<i>malus sylvestris</i>	1,7
melão cantaloupe	<i>cucumis melo</i>	2,2
milho doce	<i>zea mays</i>	1,7
milho forrageiro	<i>zea mays</i>	1,8
milho grão	<i>zea mays</i>	1,7
morango	<i>fragaria spp,</i>	1,0
nabo	<i>brassica rapa</i>	0,9
noz	<i>juglans regia</i>	1,7
pera	<i>pyrus communis</i>	1,5
pêssego	<i>prunus persica</i>	1,7
pimentão	<i>capsicum annuum</i>	1,5
pomelo (grapefruit)	<i>citrus paradisi</i>	1,8
rabanete	<i>raphanus sativus</i>	1,2
repolho	<i>brassica oleracea capitata</i>	1,8
romã	<i>punica granatum</i>	2,5
sesbânia	<i>sesbania exaltata</i>	2,3
soja	<i>glycine max</i>	5,0
sorgo	<i>sorghum bicolor</i>	4,0
tamareira	<i>phoenix dactylifera</i>	4,0
tomateiro	<i>lycopersicon lycopersicum</i>	2,5
trigo	<i>triticum aestivum</i>	6,0
vagem	<i>phaseolus vulgaris L.</i>	1,5
videira	<i>vitis spp.</i>	1,5

Tabela 4.4 Valores de condutividade elétrica do extrato saturado capazes de afetar em 10% o desenvolvimento de flores.

Nome Comum e cultivar	CEes (dS m ⁻¹)
Azaléa	1,0
Cravo cv. Sims	2,5
Crisântemo cv. Bronz Kramer	6,0
Crisântemo cv. Albatroz	2,0
Gardênia cv. Belmont	1,0
Gerânio (pelargônio)	1,5
Gadíolo (palma de Sta. Rita) cv. Spotlight ou Valoras	1,5
Lírio cv. Croft	1,5
Poinsetia (eufórbia, coroa de cristo) cv. Barbara Ecke	2,5
Rosa cv. Better Times	3,5
Violeta Africana cv. Mentor Boy	1,5

4.3.3 Tolerância das plantas à toxidez específica de alguns íons

Boro: Uma pequena concentração de boro é necessária para que as plantas possam desenvolver-se satisfatoriamente. Segundo Stromberg (1980), cerca de 0,02 ppm de boro na água de irrigação é o mínimo requerido para o suprimento adequado deste nutriente às plantas. De um modo geral, os critérios de qualidade de água em relação ao boro podem ser interpretados a partir das Tabelas 4.5 e 4.6.

Os danos causados na folha pelo boro resumem-se em manchas amarelas ou secas, principalmente nas bordas e no ápice de folhas velhas (Ayers & Westcot, 1991). Também é importante ressaltar que a presença de sesquióxidos no solo como óxidos de ferro ou de alumínio podem provocar fixação de boro tornando-o insolúvel sem causar, portanto, danos às plantas. Algo similar ocorre com a presença de matéria orgânica.

Tabela 4.5 Níveis de tolerância das culturas ao boro* na água de irrigação (Biggar, 1984).

Concentração. (ppm)	Interpretação
< 0,5	Bom para todas as plantas
0,5 a 1,0	Danos ocorrem nas folhas de plantas sensíveis sem alterar a produção
1,0 a 2,0	Tolerado pelas semi-tolerantes mas reduz a produção de plantas sensíveis
2,0 a 4,0	Somente plantas tolerantes produzem satisfatoriamente
> 4,0	Danos em quase todas as plantas

* Listadas em ordem crescente de tolerância.

Tabela 4.6 Tolerância relativa das plantas ao boro na água de irrigação *

Sensíveis (0,5 a 1,0 ppm)	Semi-tolerantes (1,0 a 2,0 ppm)	Tolerantes (2,0 a 4,0 ppm)
Limão	Batata Doce	Cenoura
Pomelo (grapefruit)	Pimentão	Alface
Abacate	Tomate	Repolho
Laranja	Morango	Nabo
Amora	Aveia	Cebola
Damasco	Milho	Alfafa
Pêssego	Trigo	Beterraba
Cereja	Cevada	Tâmara
Caqui	Azeitona	Aspargo
Figo	Ervilha	
Uva	Algodão	
Maçã	Batata	
Pera	Girassol	
Ameixa		
Alcachofra		
Noz		
Noz Pecan		

*Fonte: Wilcox (citado por Bresler *et al.*, 1982).

Sódio: Assim como boro, o excesso de sódio resulta em danos principalmente nas folhas mais velhas, como queimaduras ao longo das bordas que podem espalhar-se até o centro da folha causando necroses. Segundo Biggar (1984), os sintomas aparecem nas plantas sensíveis quando a concentração de sódio atinge 0,25% (base em peso). A tolerância das plantas ao sódio baseia-se na percentagem de sódio trocável (PST) presente no solo, e resume-se basicamente às Tabelas Tabela 4.7 e 4.8.

Tabela 4.7 Tolerância relativa das culturas* ao sódio trocável.

Classe	Porcentagem de sódio trocável	Plantas
Muito Sensíveis	2 a 10	Frutas caducifólias Nozes Citros Abacate
Sensíveis	10 a 20	Feijão
Semi-tolerantes	20 a 40	Trevo Aveia Arroz
Tolerantes	40 a 60	Trigo Algodão Alfafa Cevada Tomate Beterraba

*Fonte: Pearson (1960).

Tabela 4.8 Tolerância relativa das culturas* ao sódio trocável.

Sensíveis (PST < 15)	Semi-tolerantes (PST de 15 a 40)	Tolerantes (PST > 40)
Caupi	Trigo	Capim de Rhodes
Grão de bico	Tomate	Capim Angola
Amendoim	Espinafre	Algodão
Lentilha	Sorgo	Capim Bermuda
Tangerina	Centeio	Beterraba Açucareira
Pêssego	Arroz	Beterraba
Laranja	Rabanete	Cevada
Pomelo (grapefruit)	Cebola	Alfafa
Ervilha	Aveia	
Milho	Mostarda	
Algodão (germinação)	Trevo	
Feijão	Cana-de-açúcar	
Noz	Milheto	
Frutas Caducifólias	Alface	
Abacate	Fetusca	
	Cenoura	

* Listadas em ordem crescente de tolerância.

Fonte: Ayers & Westcot (1991).

Cloreto: Os primeiros sintomas deste íon evidenciados pelas plantas são a queimadura do ápice das folhas que em estágios avançados atinge as bordas e promove a queda prematura das mesmas. Nas culturas sensíveis, os sintomas aparecem quando a concentração de cloreto na folha atinge 0,50% com base em peso (Biggar, 1984).

A tolerância das plantas ao cloreto pode ser interpretada a partir dos dados apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10. Observa-se que o tratamento convencional da água com cloro não induz efeitos maléficos às plantas pois os níveis situam-se em torno de 1 ppm.

Tabela 4.9 Níveis de tolerância das plantas ao cloreto na água de irrigação.

Concentração (ppm)	Interpretação
< 70	Bom para todas as plantas
70 a 140	Plantas Sensíveis apresentam danos moderados nas folhas
140 a 350	Semi-tolerantes apresentam danos no ápice e até nas bordas das folhas
> 350	Causam problemas severos nas plantas

Tabela 4.10 Tolerância relativa das plantas (variedades e porta-enxertos) ao cloreto na água do solo (extrato saturado).

Planta	Porta-enxerto	Concentração (meq ℓ^{-1})
Citros	Tangerina cleopatra, lima rangpur	25
Citros	Limão, tangelo, laranja azeda	15
Citros	Laranja doce, citrange	10
Frutas de caroço	Marianna	25
Frutas de caroço	Lovell, Shalil	10
Frutas de caroço	Yunnan	7
Abacate	West Indian	8
Abacate	Mexican	5

Planta	Variedade	Concentração (meq ℓ^{-1})
Videira	Thompson Seedless, Perlette	25
Videira	Cardinal, Black Rose	10
Amoreira	Boysenberry	10
Amoreira	Olallie blackberry	10
Amoreira	Indian Summer Raspberry	5
Morango	Lassen	8
Morango	Shasta	5

Fonte: Ayers & Westcot (1991), a partir de dados publicados por Maas (1984).

Embora a maioria das plantas tornem-se mais tolerantes nos estágios avançados de crescimento, há exceções. Por exemplo, o arroz parece sofrer mais durante o florescimento enquanto outras plantas sofrem mais durante a germinação e durante os primeiros estágios de crescimento. Maas (1984) cita experimentos em que o milho doce cultivado nos Estados Unidos, embora sofra durante o estágio inicial de crescimento, tolera até 9 dS m^{-1} durante o enchimento dos grãos, sem prejuízo de sua produtividade.

É recomendável, porém, manter baixos os níveis de salinidade no solo durante o plantio. Também é importante lembrar que os dados gerados pelas pesquisas e publicados na literatura foram obtidos, na sua maioria, de parcelas irrigadas por inundação ou gotejamento. Por essa razão, é preciso considerar que outros métodos como a aspersão, por exemplo, pode induzir danos maiores, pois as folhas também absorvem os sais, reduzindo a produtividade ou mesmo apresentando aspectos negativos para o mercado, a exemplo da uva esbranquiçada por precipitados químicos oriundos da evaporação da água aspergida sobre as plantas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGASSI, M.; SHAINBERG, I. & MORIN, J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, p. 848 - 851, 1981.
- AYERS, R. S. Quality of water for irrigation. **Journal of irrigation and Drainage Division**. v.103, n.1R2, p. 135-154, 1977.
- AYERS, R. S. & TANJI, K. K. Agronomic aspects of crop irrigation with waste water. Proceedings of the Conference Water Forum. **American Society of Civil Engineers**, 1981.

- AYERS, R.S. & WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Trad. de H.R. Gheyi, J.F. de Medeiros e F.A.V. Damasceno. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p. (FAO. Estudos de Irrigação e Drenagem, 29 revisado1).
- BERSTEIN, L. **Crop growth and salinity**. In: Drainage for Agriculture. van J. Schilfgaard. Agronomy 17, p.39-54, 1974.
- BIGGAR, J. W. **Water quality for agriculture and related uses**. Departamento of Land, Air and Water Resources. University of California. Class Notes. 1984.
- BOHN, H. L.; McNEAL, B. L. & O'CONNOR, B. L. **Soil chemistry**. John Wiley & Sons., 1979. 330 p.
- BRESLER, E.; McNEAL, B. L.; CARTER, D. L. **Saline and sodic soils - Principles-Dynamics-Modeling**. Springer-Verlag, New York, 1982. 236 p.
- CAMPBELL, R. B.; BOWER, C. A. & RICHARDS, L. A. Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.13, p. 66 - 69. 1949.
- CRESCIMANNO, G. & IOVINO, M. Evaluating the effects of using saline-sodic solutions on the hydrological characteristics of soil. Report N. 94-A-041. Congresso Internacional de Engenharia Agricola. Milão. 1994.
- FAO. **Prognosis of salinity and alkalinity**. Rome. 1976.
- FARNHAM, D. S.; AYERS, R. S. & HASEK, R. F. **Water quality effects ornamental plant production**. Leaflet 2995. Division of Agricultural Sciences. University of California. 1979.
- KEREN, R.; SHAINBERG, I.; FRENKEL, H. & KALO, Y. The effect of exchangeable sodium and gypsum on surface runoff from Loess Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, p.1001-1004. 1983.
- KRAMER, P. J. 1983. **Water relations of plants**. Academic Press, Inc. 489 p.
- LAUCHI, A. e E. EPSTEIN. Mechanisms of salt tolerance in plants. **California Agriculture**, v. 38, n.10, p.18-21. 1984.
- LIMA, L. A. & GRISMER, M. E. Soil crack morphology and soil salinity. **Soil Science**. v.153, v.2, p.149-153. 1992.
- LIMA, L. A. & GRISMER, M. E. Application of fracture mechanics to cracking of saline soils. **Soil Science**, v.158, n.2, 1994.
- LIMA, L. A. & GRISMER, M. E. The formation of preferential paths in shrinking and swelling soils. Proceedings of the XII World Congress on Agricultural Engineering. v. 1, p.246-252. CIGR. International Commission of Agricultural Engineering. 1994.
- LIMA, L. A.; GRISMER, M. E. & NIELSEN, D. R. Salinity Effects on Yolo Loam Hydraulic Properties. **Soil Science**, v.150. 1990.
- LIMA, R. R. & TOURINHO, M. M. **Varzeas do Rio Pará - Principais características e possibilidades agropecuárias**. Belém. FCAP. 124 p. 1996.
- MAAS, E. V. **Salt tolerance of plants**. In: The Handbook of Plant Science in Agriculture. B. R. Christie. Boca Raton. CRC Press. 1984.
- MAAS, E. V.; HOFFMAN, G. J. Crop salt tolerance - Current assessment. **Journal of Irrigation and Drainage Division**. v.103, n. IR2, p.115-134.1977.

- MINASHINA, N. G. Irrigation of soils with mineralized water and determination of the leaching conditions. In: M. B. BESSLER. **The use of saline water for irrigation in the U.S.S.R.** 1979.
- OSTER, J. D., F. W. SCHROER. Infiltration as influenced by irrigation water quality. **Soil Science Society of America Journal**, v.43, p.444-447. 1979.
- PEARSON, G. A. **Tolerance of crops to exchangeable sodium.** US Department of Agriculture Information Bulletin 216, Washington. 1960.
- RABOCHEV, I. S. Use of mineralized water to irrigate and desalinize soils and main trends of future research. In: BESSLER, M. B. **The use of saline water for irrigation in the U.S.S.R.** United States Department of Interior. Bureau of Reclamation. Engineering and Research Center. Denver. 138 p. 1979.
- RAVINA, L. Everything you want to know about coagulation and flocculation. 36 p. Zeta-Meter Inc. 1993.
- REEVE, R.C.; BOWER, C. A.; BROOKS, R. H. & GSCHWEND, F. B. A comparison of the effects of exchangeable sodium and potassium upon the physical condition of soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, p.130-132. 1954.
- RICHARDS, L.A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Handbook Nº 60. 160 p.1954.
- RUSSO, D. & BRESLER, E. Effect of mixed Na/Ca solutions on the hydraulic properties of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**. v.41, p. 713 - 717. 1977.
- RUSSO, D. e E. BRESLER. Soil-water-suction relationships as affected by soil solution composition and concentration. p.287-296. In: **Agrochemicals in Soils.** Edited by A. Banin e U. Kafkafi. Pergamon Press. 448 p. 1980.
- SCHAMP, N.; HUYLEBROECK, J. & SANDONES, M. **Adhesion and adsorption phenomena in soil conditioning.** p. 13 - 23. In: Soil Conditioners. No. 7. SSSA Special Publication Series. 186 p. 1975.
- SHAINBERG, I. & LETEY, J. **Response of soils to sodic and saline conditions.** Hilgardia. v.52, n.2 (California Agricultural Experiment Station). 1984.
- SMEDEMA, L. K. e D. W. RYCROFT. **Land drainage - Planning and design of agricultural drainage systems.** Cornell University Press, 376 p. 1983.
- SOUSA, M. R. de. Comportamento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. CV Eriparza) Submetido a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação. Tese de Mestrado. 94 p. Universidade Federal de Lavras. 1995.
- STROMBERG, L, K. **Water quality for irrigation.** Cooperative Extension of University of California. Fresno. 20 p. 1980.
- TERRY, R. E. & NELSON, S. D. Effects of polyacrylamide and irrigation method on soil physical properties. **Soil Science**. v.141, p. 317-320. 1986.
- TROUT, T.; CARTER, D. & SOJKA, B. Irrigation-induced soil erosion reduces yields and muddies rivers. **Irrigation Journal**. v.44, n.1, 1994.
- VALENTINE, R. C. Genetic Engineering of Salinity Tolerant Plants. **California Agriculture**, v.38. n.10, p.36-37. 1984.
- van GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**. v.44, p. 892-898. 1980.