

Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados

Editores

Hans R. Gheyi

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Nildo da S. Dias

Universidade Federal Rural do Semiárido

Claudian F. de Lacerda

Universidade Federal do Ceará

Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados

ISBN 978-85-7563-489-9



Instituto Nacional de Ciência e
Tecnologia em Salinidade

Fortaleza - CE
2010

Equipe Técnica

Editoração Eletrônica
Walter Luiz Oliveira do Vale

Normatização
Maria Sonia Pereira de Azevedo

Capa
Silvana Ramos Alves

Impressão
**Expressão Gráfica e Editora
Fortaleza, CE**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M274 Manejo da salinidade na agricultura: Estudo básico e aplicados / Editores:
 Hans Raj Gheyi, Nildo da Silva Dias, Claudivan Feitosa de Lacerda.”
 Fortaleza, INCT Sal, 2010.
 472p. il.; 28 cm.

ISBN: 978-85-7563-489-9

1. Salinidade. 2. Estresse Salino. 3. Agricultura biossalina.
4. Drenagem agrícola. 5. Recuperação. I. Gheyi, Hans Raj. II. Dias, Nildo
da Silva. III. Lacerda, Claudivan Feitosa de. IV. Título.

CDU- 631.413.3

Os assuntos, dados e conceitos emitidos neste Livro, são de exclusiva responsabilidade dos respectivos autores. A eventual citação de produtos e marcas comerciais não significa recomendação de utilização por parte dos autores/editores. A reprodução é permitida desde que seja citada a fonte.

Sumário

Apresentação	v
Prefácio	vii
Preface	ix
Agradecimentos	xiii
Autores	xv

Parte I - Introdução 1

1. Integrated approach to address salinity problems in irrigated agriculture	3
Julián Martínez Beltrán	
Introduction	4
Soil and water salinity in irrigated agriculture	4
Integrated approach for salinity management	6
Conclusions	6
References	8

Parte II - Salinidade no solo e na água 9

2. Origem e classificação dos solos afetados por sais	11
Mateus R. Ribeiro	
Introdução	12
Formação e evolução dos solos halomórficos	12
Classificação química e caracterização dos solos salinos e sódicos	14
Solos salinos e sódicos no sistema brasileiro de classificação de solos	17
Solos salinos e sódicos no sistema de classificação da FAO/WRB	18
Considerações finais	18
Referências	19
3. Aspectos físicos e químicos de solos em regiões áridas e semiáridas	21
Paulo A. Ferreira, João B. L. da Silva & Hugo A. Ruiz	
Introdução	22
Propriedades físico-químicas	22
Equilíbrio entre cátions em solução e adsorvidos	28
Floculação e dispersão das argilas	31
Classificação dos solos salinos	36
Comportamento das argilas decorrente da concentração salina e do pH	38
Efeitos da salinidade sobre a condutividade hidráulica	39
Referências	41

4. Qualidade da água para irrigação	43
José S. de Holanda, Julio R. A. de Amorim, Miguel Ferreira Neto & Alan C. de Holanda	
Introdução	44
Importância da água para as plantas	44
A água na natureza	45
Adequação da água para irrigação	47
Avaliação da qualidade da água para irrigação	50
Classificação da água para irrigação	53
Classes de água quanto ao risco de sodicidade	54
Qualidade da água de mananciais do Nordeste	57
Considerações finais	58
Referências	59
5. Avaliação e monitoramento da salinidade do solo	63
José E. Queiroz, Antonio C. A. Gonçalves, Jacob S. Souto & Marcos V. Folegatti	
Introdução	64
Diagnose e classificação dos solos salinos	65
Amostragem para estudos de salinidade	67
Variabilidade da salinidade do solo	72
Conclusões	81
Referências	81
6. Salinidade em ambiente protegido	83
Pedro R. F. de Medeiros, Ênio F. de F. e Silva & Sergio N. Duarte	
Introdução	84
Causas mais frequentes e formas de controle da salinidade	85
Efeitos da salinização sobre o solo e as plantas	86
Controle da concentração da solução do solo	88
Controle da salinidade via lavagem de manutenção	89
Recuperação de solos afetados por sais	90
Considerações finais	91
Referências	91
7. Modelagem do movimento de sais no solo	93
Mauro A. Martinez, Jonathas B. G. Silva & Donizete dos R. Pereira	
Introdução	94
Armazenamento de solutos no solo	94
Deslocamento de fluidos miscíveis	95
Fluxo de solutos no solo	98
Equação diferencial para o transporte convectivo e dispersivo	100
Condições iniciais e de contorno	101
Soluções analíticas	102
Soluções numéricas	104
Parâmetros de transporte	107
Exemplos de usos de modelos	108
Referências	111
Anexo	113

8. Técnicas de estatística multivariada aplicadas a estudos de qualidade de água e solo.....	115
Eunice M. de Andrade, Ana C. M. Meireles & Helba A. Q. Palácio	
Introdução.....	116
Estatística multivariada	116
Estudo de caso: Salinidade nos solos na Chapada do Apodi.....	118
Análise de componentes principais - ACP.....	121
Estudo de caso: Qualidade das águas na bacia hidrográfica do Rio Acaraú, Ceará.....	123
Referências.....	125
Parte III - Tolerância das plantas à salinidade	127
9. Efeitos dos sais no solo e na planta	129
Nildo da S. Dias & Flávio F. Blanco	
Introdução.....	130
Efeitos dos sais na planta	130
Efeito dos sais sobre o solo	134
Tolerância das plantas à salinidade	136
Referências.....	140
10. Fisiologia e bioquímica do estresse salino em plantas	143
José T. Prisco & Enéas Gomes Filho	
Introdução	144
Retrospectiva histórica da fisiologia e bioquímica do estresse salino	144
Efeitos da salinidade no crescimento e desenvolvimento	147
Respostas fisiológicas e bioquímicas ao estresse salino	148
Aclimação ao estresse	152
Considerações finais	154
Agradecimentos	155
Referências.....	155
Anexo. Glossário de termos usados	159
11. Mecanismos biomoleculares envolvidos com a resistência ao estresse salino em plantas	161
Joaquim A. G. Silveira, Sérgio L. F. Silva, Evandro N. Silva & Ricardo A. Viégas	
Introdução	162
Efeitos do estresse salino e principais mecanismos de respostas das plantas.....	163
Mecanismos biomoleculares da resistência à salinidade.....	165
Homeostase iônica	170
Homeostase redoxi e proteção oxidativa	173
Seleção assistida com marcadores moleculares.....	177
Conclusões e perspectivas	178
Referências.....	179

12. Biossalinidade e produção agrícola	181
Pedro D. Fernandes, Hans R. Gheyi, Albericio P. de Andrade & Salomão de S. Medeiros	
Introdução	182
Halofitismo	183
Ecofisiologia das halófitas	184
Salinidade x produção	191
Cultivos biossalinos	192
Água do mar na agricultura biossalina	195
Referências	199
13. Melhoramento genético vegetal e seleção de cultivares tolerantes à salinidade	205
Nand K. Fageria, Walter dos S. Soares Filho & Hans R. Gheyi	
Introdução	206
Salinidade e rendimento das culturas	207
Considerações sobre a metodologia de avaliação para tolerância à salinidade	207
Melhoramento genético vegetal para tolerância à salinidade	212
Espécies de plantas adaptadas ao cultivo sob condições salinas	214
Perspectivas futuras	215
Conclusões	215
Referências	216
Parte IV - Manejo do sistema solo-água-plantas	219
14. Interações salinidade-fertilidade do solo	221
Rivaldo V. dos Santos, Lourival F. Cavalcante & Adriana de F. M. Vital	
Introdução	222
As interações salinidade-fertilidade	223
Dinâmica dos nutrientes em solos salinizados	230
Influência da matéria orgânica	234
Manejo da fertilidade em solos salinos e sódicos	235
Resultados de pesquisa	239
Estudos de correlação	249
Referências	250
15. Estimativa da evapotranspiração das culturas em ambiente salino	253
Luís S. Pereira & Isabel Alves	
Evapotranspiração - conceitos fundamentais	254
Evapotranspiração da cultura de referência, ET_o	256
Evapotranspiração das culturas	257
Evapotranspiração real, correção da ET_c e dos K_c devido a condições adversas de cultivo	262
Evapotranspiração real, balanço hídrico do solo e coeficientes de stress	263
Referências	267
Anexo 1. Coeficientes de cultura médios, K_c , e de base, K_{cb} , para culturas com bom manejo em clima sub-húmido para uso com a ET_o FAO-PM (Fontes: Allen et al., 1998, 2007; Allen & Pereira, 2009).	269
Anexo 2. Altura máxima (h), profundidade radicular máxima (Zr) e fração de esgotamento da água do solo em conforto hídrico (p) para diversas culturas (Allen et al., 1998)	275

16. Manejo do solo-água-planta em áreas afetadas por sais	279
José F. de Medeiros, Jarajane B. do Nascimento & Hans R. Gheyi	
Introdução	280
Origem da salinidade em áreas irrigadas	281
Qualidade da água de irrigação	281
Efeitos prejudiciais dos sais nas áreas irrigadas	282
Fatores que afetam a salinidade do solo e resposta das culturas à salinidade	286
Previsão de salinidade em áreas irrigadas	291
Experiências no Nordeste brasileiro com água salina	295
Conclusões	299
Referências	299
17. Estratégias de manejo para uso de água salina na agricultura	303
Claudivan F. de Lacerda, Raimundo N. T. Costa, Marlos A. Bezerra & Hans R. Gheyi	
Introdução	304
Caracterização do problema	305
Escolha da espécie ou cultivar e formação do 'stand'	306
Misturas e substituição de águas	307
Práticas de manejo do solo e irrigação	309
Rotação de culturas e uso de cultivos adensados	311
Práticas que favorecem a aquisição de minerais pelas plantas	313
Considerações finais	315
Referências	315
18. SALTMED Model as an integrated management tool for water, crop, soil and fertilizers	319
Ragab Ragab	
Introduction	320
The SALTMED 2009 Model main features	322
Detailed description of the processes in the SALTMED Model	324
SALTMED Model frames (user Interface) and examples of outputs	330
Model application	335
References	335
19. Uso de águas salobras em sistemas hidropônicos de cultivo	337
Tales M. Soares, Sergio N. Duarte, Ênio F. de F. e Silva, Vital P. da S. Paz & Jorge L. Barcelos-Oliveira	
Introdução	338
A alternativa da produção hidropônica no semiárido	339
Qualidade química da água para hidroponia	345
Considerações finais	361
Agradecimentos	363
Referências	363

Parte V - Drenagem para controle da salinidade e recuperação de áreas afetadas por sais	367
20. Drenagem agrícola no manejo dos solos afetados por sais	369
Vera L. A. de Lima, Maria S. S. de Farias & João C. F. Borges Júnior	
Introdução	370
Diagnóstico de problemas de drenagem	370
Drenagem agrícola e salinidade	371
Critérios de drenagem	374
Envoltórios	374
Aplicação de modelos na drenagem agrícola	374
Referências.....	381
21. Dimensionamento de sistemas de drenagem	383
Hermínio H. Suguino & José C. Barros	
Introdução	384
Drenagem superficial	384
Cálculos de espaçamento entre drenos e dimensionamento de drenos subterrâneos.....	395
Estudo de caso: Projeto irrigado brígida	402
Referências.....	403
Anexo 1. Terminologia e simbologia em drenagem agrícola	404
Anexo 2. Quadro de quantitativos e custos.....	407
22. Biodrenagem	409
Salomão de S. Medeiros, Pedro D. Fernandes, José A. Santos Júnior & Hans R. Gheyi	
Introdução	410
Princípios da biodrenagem	410
Principais culturas utilizadas na biodrenagem	411
Vantagens e limitações da biodrenagem	411
Biodrenagem e controle da salinidade do solo	411
Cenários para implantação do sistema de biodrenagem	414
Planejamento de sistemas de biodrenagem	416
Dimensionameto do sistema de biodrenagem	417
Estudos de casos e experiências	418
Considerações finais	423
Referências	423
23. Recuperação de solos afetados por sais.....	425
Lourival F. Cavalcante, Rivaldo V. dos Santos, Fernando F. F. Hernandez, Hans R. Gheyi & Thiago J. Dias	
Introdução	426
Técnicas de recuperação de solos afetados por sais	426
Recuperação de solos salinos.....	428
Métodos de lavagem	433
Recuperação dos solos sódicos e salino-sódicos	436
Referências.....	447

24. Indicadores de rentabilidade da recuperação de solos sódicos	449
Raimundo N. T. Costa, Claudivan F. de Lacerda, Luiz A. C. da Silva & Ana P. B. de Araújo	
Introdução	450
Análise de investimento	450
Estudos de caso na bacia hidrográfica do Rio Curu-CE	454
Considerações finais	457
Referências	457
25. Fitorremediação de solos afetados por sais	459
Maria B. G. dos S. Freire, Edivan R. de Souza & Fernando J. Freire	
Introdução	460
Definição de fitorremediação	460
Histórico da fitorremediação em solos afetados por sais	461
Período de recuperação	462
Espécies de plantas para fitorremediação	463
Gênero <i>Atriplex</i>	464
Uso da biomassa produzida na alimentação animal	466
Mecanismos e processos envolvidos na fitorremediação	468
Manejo da fitorremediação	469
Considerações finais	469
Referências	470

9

Efeitos dos sais no solo e na planta

Nildo da S. Dias¹ & Flávio F. Blanco²

¹ Universidade Federal Rural do Semi-Árido

² Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Meio Norte

Introdução

Efeitos dos sais na planta

Efeito osmótico

Efeitos tóxicos

Efeitos indiretos

Efeito dos sais sobre o solo

Efeitos sobre a estrutura

Efeito sobre o pH

Alteração dos parâmetros físico-hídricos do solo

Tolerância das plantas à salinidade

Estado nutricional das plantas

Ajuste osmótico

Sinalização bioquímica e melhoramento genético

Toxidez

Referências

Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados

ISBN 978-85-7563-489-9



Instituto Nacional de Ciência e
Tecnologia em Salinidade

Fortaleza - CE
2010

Efeitos dos sais no solo e na planta

INTRODUÇÃO

A agricultura está enfrentando um grande problema em todo o mundo com a falta de recursos hídricos adequado, forçando muitos produtores a utilizar água salobra para a irrigação das culturas (Reed, 1996). Em muitas áreas de produção, o uso de água de baixa qualidade para irrigação e a aplicação de quantidades excessivas de fertilizantes são as principais razões para o problema do aumento da salinidade do solo. Em se tratando de regiões áridas e semiáridas irrigadas, constitui um sério problema, limitando a produção agrícola e reduzindo a produtividade das culturas a níveis anti-econômicos.

Os efeitos da salinização sobre as plantas podem ser causados pelas dificuldades de absorção de água, toxicidade de íons específicos e pela interferência dos sais nos processos fisiológicos (efeitos indiretos) reduzindo o crescimento e o desenvolvimento das plantas. No solo, os efeitos negativos da salinização são desestruturação, aumento da densidade aparente e da retenção de água do solo, redução da infiltração de água pelo excesso de íons sódicos (Rhoades et al., 2000) e diminuição da fertilidade físico-química.

A implicação prática da salinidade sobre o solo é a perda da fertilidade e a susceptibilidade à erosão, além da contaminação do lençol freático e das reservas hídricas subterrâneas. Nas plantas, estes efeitos implicam na perda de produtividade e de qualidade, ou perda total da produção.

O conhecimento dos efeitos dos sais na planta e no solo, bem como os fenômenos envolvidos são fundamentais quando se pretende adotar práticas de manejos adequados da água e de cultivo visando à produção comercialmente com água salina. Deste modo, este capítulo trata das interações dos sais com a planta e o solo em cultivos agrícolas e a tolerâncias das culturas à salinidade.

EFEITOS DOS SAIS NA PLANTA

Efeito osmótico

As plantas retiram a água do solo quando as forças de embebição dos tecidos das raízes são superiores às forças com que a água é retida no solo. A presença de sais na solução do solo faz com que aumentem as forças de retenção por seu efeito osmótico e, portanto, a magnitude do problema de escassez de água na planta. O aumento da pressão osmótica (PO) causado pelo excesso de sais solúveis, poderá atingir um nível em que as plantas não terão forças de sucção suficiente para superar esse PO e, em consequência, a planta não irá absorver água, mesmo de um solo aparentemente úmido (seca fisiológica).

Dependendo do grau de salinidade, a planta, em vez de absorver, poderá até perder a água que se encontra no seu interior. Esta ação é denominada plasmólise e ocorre quando uma solução altamente concentrada é posta em contato com a célula vegetal. O fenômeno é devido ao movimento da água, que passa das células para a solução mais concentrada.

A Figura 1 mostra a curva de retenção de água de um solo franco-argiloso para vários níveis de salinidade. Observa-se que a disponibilidade de água para a cultura é reduzida a medida em que a salinidade aumenta.

O potencial osmótico de um solo pode ser estimado conhecendo-se a CE, a partir da equação:

$$\psi_o \cong -0,36 \times CE \quad (1)$$

em que:

- Ψ_o - potencial osmótico, atm
- CE - condutividade elétrica, dS m⁻¹

Assim, o potencial total com que a água é retida em um solo salino, pode ser expresso por:

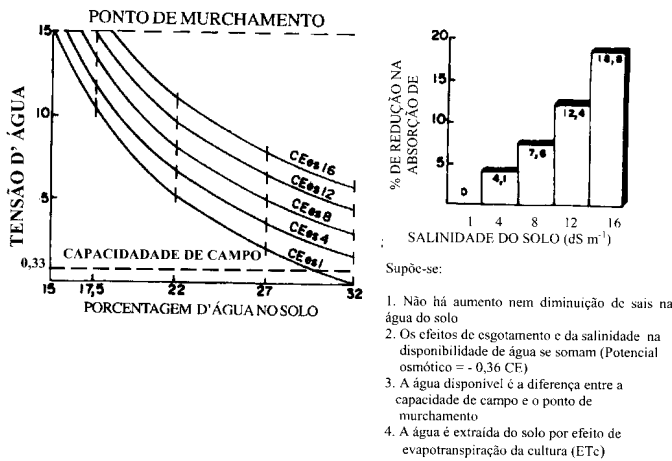


Figura 1. Curvas de retenção de água de um solo franco-argiloso para vários níveis de salinidade (Ayres & Westcot, 1999)

$$\Psi_T = \Psi_m + \Psi_o \quad (2)$$

em que:

- Ψ_T - potencial total com que a água é retida no solo, atm
- Ψ_m - potencial matricial do solo, atm
- Ψ_o - potencial osmótico da solução do solo, atm.

Devido à baixa concentração de sais solúveis, o potencial osmótico em solos não salinos é considerado desprezível ($\Psi_o = 0$); logo, a água deste solo está disponível a uma faixa de potencial de -33 e -1500 kPa, em condições de capacidade de campo e ponto de murcha permanente, respectivamente, porém a presença de sais faz com que essa faixa de disponibilidade seja diminuída, em razão do aumento da tensão total pois, neste caso, considera-se o potencial osmótico ($\Psi_o < 0$).

Exemplo:

O procedimento a seguir determina a salinidade e a contribuição relativa do potencial osmótico para o aumento do potencial total de um solo salino de textura média, em condições de umidade à capacidade de campo e ponto de murcha permanente.

Dados:

- Salinidade do solo: $CE_{es} = 10 \text{ dS m}^{-1}$
- Considerando-se que um solo de textura média tem, normalmente, umidade à capacidade de campo e ponto de murcha, respectivamente, igual à metade e a um quarto da condição de saturação, ou seja:

$$\theta_s = 2\theta_{CC} = 4\theta_{PM} \quad (3)$$

em que:

- θ_s - umidade do solo nas condições de saturação, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ou %
- θ_{CC} e θ_{PM} - umidade do solo à capacidade de campo e ponto de murcha permanente, respectivamente, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ou %.

Procedimentos:

a) Solo à capacidade de campo

- A condutividade elétrica, em dS m^{-1} , à capacidade de campo (CE_{CC}) é obtida considerando-se que a solução salina se concentra no solo duas vezes, mediante a Eq. 4:

$$CE_{CC} = 2 \times CE_{es} \quad (4)$$

$$CE_{CC} = 2 \times 10 = 20 \text{ dS m}^{-1}$$

- O potencial osmótico deste solo à capacidade de campo é obtido segundo a Eq. 1:

$$\Psi_o = -36 \times 20 = -720 \text{ kPa}$$

- O potencial total com que a água é retida no solo a capacidade de campo, é obtido substituindo-se os valores do " Ψ_m " e " Ψ_o " na Eq. 2:

$$\Psi_T = -33 - 720 = -753 \text{ kPa}$$

- A contribuição relativa do Ψ_o na diminuição do potencial total à capacidade de campo é obtida mediante a relação percentual entre o potencial osmótico e o potencial total

$$\% \Psi_o = \left(\frac{-720}{-753} \right) \times 100 = 95\% \text{ do potencial total}$$

b) Solo no ponto de murcha

- A condutividade elétrica, em dS m^{-1} , no ponto de murcha (CE_{PM}) é obtida, considerando-se que a solução salina se concentra no solo quatro vezes, conforme a Eq. 3:

$$CE_{PM} = 4 \times 10 = 40 \text{ dS m}^{-1}$$

- O potencial osmótico deste solo no ponto de murcha é obtido de acordo com a Eq. 1:

$$\Psi_o = -36 \times 40 = -1440 \text{ kPa}$$

- O potencial total com que a água é retida no solo em ponto de murcha é obtido, substituindo-se os valores do “ Ψ_m ” e “PO” na Eq. 8.2:

$$\psi_T = -1500 - 1440 = -2940 \text{ kPa}$$

- A contribuição relativa do Ψ_0 na diminuição do potencial total no ponto de murcha é obtida mediante a relação percentual entre o potencial osmótico e o potencial total

$$\% \psi_0 = \left(\frac{-1440}{-2940} \right) \times 100 = 48,97\% \text{ do potencial total}$$

Os cálculos anteriores mostram que a tensão total com que a água é retida no solo à capacidade de campo e ponto de murcha é, respectivamente, 753 e 2940 kPa. É obvio que a contribuição relativa do Ψ_0 é maior quando o solo se encontra à capacidade de campo e a mesma é aumentada a cada elevação da CE_{es} . A medida em que o conteúdo de água no solo diminui, a disponibilidade de água para as plantas varia continuamente em cada camada da zona radicular, já que tanto o conteúdo de água como Ψ_0 variam continuamente, entre dois eventos de irrigação, devido ao consumo de água pela planta. Para a mesma profundidade, pouco depois da irrigação o teor de água no solo se aproxima de seu máximo, enquanto a concentração dos solutos é mínima; conseqüentemente, ambos os teores variam à medida que a água é consumida pela planta, sendo que o teor de umidade diminui enquanto os sais aumentam.

A salinidade do solo reduz a disponibilidade da água no solo; no entanto, nem todas as culturas são igualmente afetadas pelo mesmo nível de salinidade, pois algumas são mais tolerantes que outras e podem extrair água com mais facilidade. Com base na resposta aos sais, as plantas são classificadas em glicófitas e halófitas. As glicófitas representam o grupo das plantas cultivadas e, na sua maioria, são as menos tolerantes à ação dos sais, enquanto as halófitas compõem o grupo de plantas que adquirem condições fisiológicas; portanto, ajustam-se osmoticamente e sobrevivem em meio altamente salino.

Plantas mais tolerantes ao meio salino aumentam a concentração salina no seu interior, de modo que permaneça um gradiente osmótico favorável para absorção de água pelas raízes. Este processo é chamado ajuste osmótico e se dá com o acúmulo dos íons absorvidos nos vacúolos das células foliares, mantendo a concentração salina no citoplasma em baixos níveis, de modo que não haja interferência com os mecanismos enzimáticos e metabólicos nem com a hidratação de

proteínas das células. Esta compartimentação do sal é que permite, às plantas tolerantes, viverem em ambientes salinos, porém as plantas sensíveis à salinidade tendem a excluir os sais na 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.

Efeitos tóxicos

Esses efeitos acontecem quando as plantas absorvem os sais do solo, juntamente com a água, permitindo que haja toxidez na planta por excesso de sais absorvidos. Este excesso promove, então, desbalanceamento e danos ao 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, nessas regiões, acúmulo do sal translocado do solo para a planta e, obviamente, intensa toxidez de sais.

Os danos podem reduzir significativamente os rendimentos e sua magnitude depende do tempo, da concentração de íons, da tolerância das plantas e do uso da água pelas culturas. Os problemas de toxicidade frequentemente acompanham ou complicam os de salinidade ou permeabilidade, podendo surgir mesmo quando a salinidade for baixa. Os sintomas de toxicidade podem aparecer em qualquer cultura se as concentrações de sais no interior são suficientemente altas ou acima de níveis de tolerância da cultura.

Normalmente, a toxicidade é provocada pelos íons cloreto, sódio e boro; entretanto, muitos outros oligoelementos são tóxicos às plantas, mesmo em pequenas concentrações.

A absorção foliar acelera a velocidade de acumulação de sais dos íons tóxicos na planta sendo, muitas vezes, a fonte principal da toxicidade. Os íons, sódio e cloreto podem, também, ser absorvidos via foliar, quando se molham durante a irrigação por aspersão e, sobretudo, durante períodos de altas temperaturas e baixa umidade. A Tabela 1 mostra algumas culturas afetadas por íons específicos.

Cloreto: O cloreto não é retido nem adsorvido pelas partículas do solo, deslocando-se facilmente com a água do solo, mas é absorvido pelas raízes e translocado às folhas, onde se acumula pela transpiração.

O primeiro sintoma deste íon, evidenciado pelas plantas, é a queimadura do ápice das folhas que, em estágios avançados, atinge as bordas e promove sua queda prematura; nas culturas sensíveis, os sintomas aparecem quando se alcançam concentrações de 0,3 a 1,0 % de cloreto, em base de peso seco das folhas.

Tabela 1. Algumas culturas afetadas por íons específicos (Pizarro, 1978)

Íons	Fruteiras	Hortaliças	Culturas extensivas
Na ⁺	Amendoeira		Milho
	Abacateiro		
	Citros		
	Pessegueiro		
	Videira		
	Morangueiro		
Ca ⁺⁺		Folhosas	Linho
Cl ⁻	Abacateiro	Batata Doce	Fumo
	Citros		
	Videira		
SO ₄ ⁻	Bananeira	Alface	
NO ₃ ⁻			Beterraba açucareira
			Cana-de-açúcar

A sensibilidade das culturas a este íon é bastante variável como, por exemplo, as frutíferas, que começam a mostrar sintomas de danos a concentrações acima de 0,3 % de cloreto, em base de peso seco, as espécies tolerantes podem acumular até 4,0 a 5,0 % de cloreto sem manifestar qualquer sintoma de toxicidade. A Tabela 2 apresenta, para certas culturas, os valores de tolerância ao cloreto, medidos no extrato de saturação e na água de irrigação.

É recomendável manter baixos os níveis de salinidade no solo durante o plantio e lembrar que os dados publicados na literatura foram obtidos de parcelas com culturas irrigadas por superfície. Por esta razão, é necessário considerar-se que a irrigação por aspersão pode causar queimaduras das folhas a nível inferior a esses, pois as folhas também absorvem os sais.

Sódio: A toxicidade ao sódio é mais difícil de diagnosticar que ao cloreto, porém tem sido identificada claramente como resultado de alta proporção de sódio na água (alto teor de sódio ou RAS).

Ao contrário dos sintomas de toxicidade do cloreto, que têm início no ápice das folhas, os sintomas típicos do sódio aparecem em forma de queimaduras ou necrose, ao longo das bordas. As concentrações de sódio nas folhas alcançam níveis tóxicos após vários dias ou semanas e os sintomas aparecem, de início, nas folhas mais velhas e em suas bordas e, a medida em que o problema se intensifica, a necrose se espalha progressivamente na área internervural, até o centro das folhas. Para as culturas arbóreas, o nível tóxico nas folhas se encontra em concentrações acima de 0,25 a 0,50 % de sódio, em base de peso seco. A Tabela 3 classifica a tolerância de várias culturas ao sódio, utilizando-se três níveis de percentagem de sódio trocável.

Tabela 2. Tolerância relativa das plantas (variedades e porta enxerto) ao cloreto, medidas no extrato de saturação e na água de irrigação (Ayers & Westcot, 1991)

Planta	Porta-enxerto ou variedade	Nível máximo permissível de cloretos (mmol _c L ⁻¹)	
		Zona Radicular (Cl _{es})	Água de irrigação (Cl _a)*
Citros	Tangerina	25,0	16,6
	Cleópatra		
Citros	Limão e laranja azeda	15,0	10,0
	Laranja doce e citrage		
Frutas do caroço	Marianna	25,0	17,0
	Lovell e Shalil		
Frutas do caroço	Yunnan	7,5	5,0
	West Indian		
Abacate	Mexican	5,0	3,3
	Thompson Seedless		
Videira	Cardinal e black Rose	10,0	6,7
	Boysenberry		
Amoreira	Ojallie	10,0	6,7
	blackberry		
Amoreira	IndiaSummer	5,0	3,3
	Raspberry		
Morangueiro	Lassen	7,5	5,0
	Shasta		

* Valores máximos aplicáveis apenas para culturas irrigadas por superfície. Para culturas irrigadas por aspersão pode causar queimadura das folhas a nível inferiores a esses

Tabela 3. Tolerância relativa das culturas* ao percentagem do sódio trocável (PST) (Ayers & Westcot, 1991)

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
Pêssego	Arroz	Açucareira
Laranja	Rabanete	Beterraba
Pomelo (grapefruit)	Cebola	Cevada
Ervilha	Aveia	Alfafa
Milho	Mostarda	
Algodão (germinação)	Trevo	
Feijão	Cana-de-açúcar	
Noz	Milheto	
Frutas caducifólias	Alface	
Abacate	Fetusca	
	Cenoura	

* Listada em ordem crescente de tolerância

Boro: O boro é um elemento essencial ao desenvolvimento das plantas, porém em quantidades relativamente pequenas. Para algumas culturas, se o nível de boro na água é de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$, as concentrações entre 1 e 2 mg L^{-1} são tóxicas. As águas superficiais raramente contêm níveis tóxicos de boro, mas as águas de nascentes e as águas de poços podem conter concentrações tóxicas, principalmente nas proximidades de falhas sísmicas e áreas geotérmicas. De modo geral, os critérios de qualidade de água em relação ao boro podem ser interpretados a partir das Tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Níveis de tolerância das culturas ao boro na água de irrigação (Ayers & Westcot, 1999)

Concentração (mg L^{-1})	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 por 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

Tabela 5. Tolerância relativa das plantas* ao boro na água de irrigação (Ayers & Westcot, 1999)

Sensíveis ($0,5$ a $1,0 \text{ mg L}^{-1}$)	Semi-tolerantes ($1,0$ a $2,0 \text{ mg L}^{-1}$)	Tolerantes ($2,0$ a $4,0 \text{ mg L}^{-1}$)
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		

* Listadas em ordem crescente de tolerância

Os problemas de toxicidade ocorrem, com maior frequência, por causa do boro na água que no solo. Os sintomas causados na folha pelo boro se resumem em manchas amarelas ou secas, principalmente nas bordas e no ápice das folhas velhas. Na medida em que o boro se acumula, os sintomas se estendem pelas áreas internervurais até o centro das folhas. Em alguns casos,

os sintomas se manifestam mediante exudação gomosa nos ramos e no tronco como, por exemplo, na amendoeira.

Na maioria das culturas, os sintomas aparecem quando a concentração de boro nas folhas excede 250 a 300 mg kg^{-1} de matéria seca.

Efeitos indiretos

Esses efeitos acontecem quando as altas concentrações de sódio ou outros cátions na solução interferem nas condições físicas do solo ou na disponibilidade de alguns elementos, afetando o crescimento e o desenvolvimento das plantas, indiretamente.

Quando no extrato de saturação há teores apreciáveis de carbonato de sódio, o pH do solo poderá alcançar valores elevados e haver a diminuição na disponibilidade de zinco, cobre, manganês, ferro e boro, podendo ocorrer deficiência nas plantas cultivadas nessas condições, principalmente se em pequenas quantidades. Portanto, o crescimento da planta é influenciado não diretamente pelo excesso de carbonato de sódio, mas pelo seu efeito sobre o pH do solo.

A presença de um íon em excesso poderá provocar deficiência ou inibir a absorção de outro, devido à precipitação. Por exemplo, o excesso de sulfato, carbonato e bicarbonato, poderá precipitar o cálcio e afetar o crescimento da planta pela falta do elemento precipitado e não pelo excesso de outro íon. Um outro efeito indireto é o excesso de sódio trocável no solo, que provoca condições físicas desfavoráveis para o crescimento das plantas, sobretudo para o desenvolvimento do sistema radicular. A presença de sais de sódio também tende a restringir a taxa de mineralização do nitrogênio (N) já que, com o aumento de sua concentração no solo, em geral a mineralização do N orgânico é reduzida, afetando o crescimento da planta, pela redução do N disponível e não pelo excesso de sódio.

EFEITO DOS SAIS SOBRE O SOLO

Efeitos sobre a estrutura

O efeito dos sais sobre a estrutura do solo ocorre, basicamente, pela interação eletroquímica existente entre os cátions e a argila.

A característica principal deste efeito é a expansão da argila quando úmida e a contração quando seca, devido ao excesso de sódio trocável. Se a expansão for exagerada, poderá ocorrer a fragmentação das partículas, causando a dispersão da argila e modificando a estrutura do solo. De modo generalizado, os solos sódicos, ou seja, com excesso de sódio trocável,

apresentam problemas de permeabilidade e qualquer excesso de água causará encharcamento na superfície do solo, impedindo a germinação das sementes e o crescimento das plantas, por falta de aeração.

A dispersão do solo pode ser explicada com base na interação dos cátions com a argila. Como já mencionado, a micela do solo ou partícula de argila tem cargas predominantemente negativas que são neutralizadas por atraírem cátions presentes no sistema coloidal. Por outro lado, os ânions, por terem cargas negativas, são repelidos, afastando-se da partícula de argila. Deste modo, é formada ao redor da argila uma dupla camada iônica.

O modelo mais aceitável desta dupla camada é o de Stern, que consiste de uma camada de íons adsorvidos na superfície da argila e de uma camada difusa de cátions, de concentração decrescente, à medida que se afasta da partícula de argila. A certa distância da argila a concentração de cátions diminui e a de ânions aumenta na solução a medida que se afasta da partícula, tornando-se balanceadas (Figura 2).

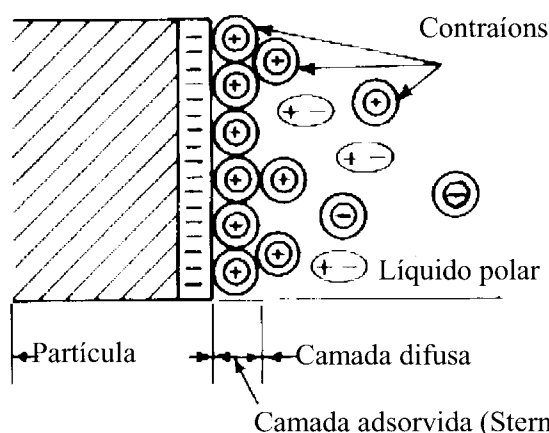


Figura 2. Modelo de Stern (distribuição dos íons em solução em função da distância da superfície da argila)

Quanto maior a carga, maior também será a força de atração, razão pela qual os cátions bivalentes (como Ca^{2+} e Mg^{2+}) são atraídos pela superfície da argila com maior força eletrostática que os monovalentes (como Na^+ e K^+).

A força de atração entre as cargas opostas (positiva e negativa) é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as cargas, ou seja, quanto maior o raio iônico, menor é a espessura da dupla camada, porém a hidratação dos cátions é um fator importante a se considerar quando se refere ao raio iônico. Assim, embora o lítio seja o cátion de menor raio iônico, ao se hidratar ele tem maior raio e, portanto produzirá menor espessura da dupla camada (Tabela 6).

A força eletrostática dos bivalentes é superior ao efeito da hidratação, diminuindo a espessura entre cargas negativas da argila e as cargas positivas dos cátions;

Tabela 6. Raio iônico hidratado e não hidratado em Å° (angstroms)

Íon	Raio não hidratado	Raio hidratado
Lítio	0,60	10,03
Sódio	0,98	7,90
Potássio	1,33	5,32
Magnésio	1,43	5,37

assim, a força de hidratação é superada com mais facilidade pelos bivalentes, fazendo com que o cálcio e o magnésio sejam mais atraídos à argila que, por exemplo, o sódio; então, a dupla camada de íons existente ao redor da argila tem espessura menor quando predominam cátions bivalentes ou mesmo trivalentes, como o Al^{3+} .

Por outro lado, o aumento da concentração da solução do solo faz com que os cátions sejam atraídos fortemente pela superfície da argila (Tabela 7); assim, com o aumento da relação Ca/Na na solução do solo, a espessura da dupla camada diminui porém, quando a dupla camada de íons junto à argila contiver muito sódio e poucos íons em solução (solo irrigado com água de baixa concentração de sais) terá espessura relativamente maior. Então, a alta concentração de sais solúveis no solo (salinidade) 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.

Tabela 7. Efeito da concentração de cátions no tamanho da dupla camada difusa

Concentração (Normal)	Tamanho da dupla camada iônica (Å)		
	NaCl	CaCl_2	AlCl_3
10^{-5}	954	477	318
10^{-4}	302	151	101
10^{-3}	95	48	32
10^{-2}	30	15	10
10^{-1}	10	5	3
10^0	3	1,5	1

A espessura da dupla camada exerce efeito pronunciado no comportamento físico do solo e quando este se encontra mais ou menos em capacidade de campo, a espessura da dupla camada desenvolve seu potencial máximo e, a medida em que o solo vai perdendo água, pode alcançar níveis em que a dupla camada não poderá permanecer em sua espessura normal, particularmente as camadas grossas encontradas em solos sódicos, transformando-se em uma dupla camada truncada. Ao umedecer o solo, a dupla camada se expande, causando o fechamento dos poros interagregados e reduzindo a condutividade hidráulica do solo; além disso, a pressão que originou a expansão empurra as partículas individuais de argila uma contra a

outra, dispersando o solo e seus agregados, fazendo-os desaparecer em partes. As partículas finas que ficam soltas, obstruem os poros do solo, reduzindo ainda mais a permeabilidade à água e ao ar.

Efeito sobre o pH

Em geral, para reduzidas concentrações de sais o pH das águas pode ser elevado, pois a medida em que aumenta a salinidade da água, o pH diminui. Para salinidade maior que 5 dS m^{-1} as águas têm pH neutro. Fenômeno semelhante ocorre com a solução do solo. Por exemplo, a Figura 3 mostra como o pH de um solo aluvial, textura argilosa e pobre em matéria orgânica, diminui quando se aumenta a condutividade elétrica, cujos valores não podem ser generalizados para outros tipos de solo, pois esta diminuição varia com as características do solo.

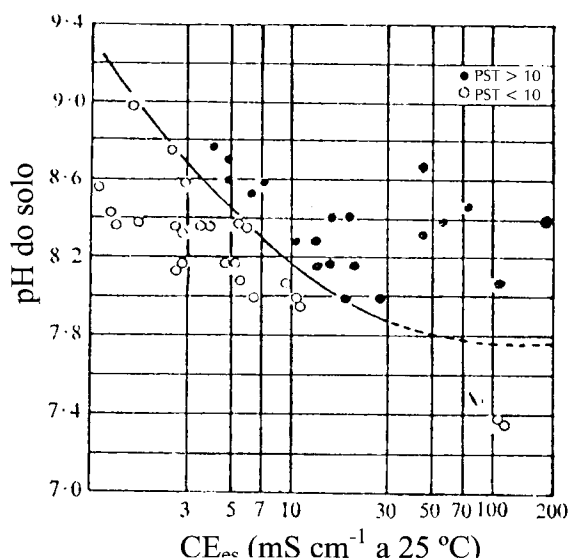


Figura 3. Relação entre o pH de um solo aluvial e a condutividade elétrica (Pizarro, 1977)

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, 1994).

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 matricial (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 Eq. 5, observaram que a sodicidade reduz o valor do parâmetro α (alfa), enquanto aumenta os valores de n e m .

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (5)$$

em que:

θ - umidade volumétrica,

h - é o potencial matricial e os subscritos r e s correspondem, respectivamente, aos níveis de umidade residual e de saturação.

TOLERÂNCIA DAS PLANTAS À SALINIDADE

A redução do crescimento da planta devido o estresse salino pode estar relacionado com os efeitos adversos do excesso de sais sob homeostase iônica, balanço hídrico, nutrição mineral e metabolismo de carbono fotossintético (Zhu, 2001; Munns, 2002). Os mecanismos pelo qual o estresse salino deprecia as plantas ainda é uma questão discutida devido à natureza muito complexa do estresse salino na planta.

Devido ao rápido acúmulo de sais no solo das áreas irrigadas, os problemas de salinização é um fator crítico para produção vegetal. Entre as espécies sensíveis ao estresse salino, o efeito da salinidade manifesta-se por severas reduções do crescimento e distúrbio na permeabilidade da membrana, atividade de troca hídrica, condutância estomática, fotossíntese e equilíbrio iônico (Shannon & Grieve, 1999; Navarro et al., 2003; Cabanero et al., 2004).

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 e Hoffman

(1977), Ayers (1977), Bresler et al. (1982), Maas (1984), e Ayers e Westcot (1999). Alguns valores extraídos dessas publicações são listados na Tabela 8.

Existem diferentes mecanismos de tolerância das plantas à salinidade. Tester e Davenport (2003) sugerem a existência de dois grupos de mecanismos de tolerância: (1) tolerância individual das células, envolvendo, por exemplo, a compartimentação intracelular e a sinalização bioquímica, e (2) tolerância a um nível superior em relação ao grupo anterior, envolvendo, por exemplo, o controle da absorção e transporte interno de sais e o acúmulo de Na nos interior da planta.

Estado nutricional das plantas

Dentre os fatores estudados para caracterizar a tolerância das plantas à salinidade, uma grande atenção

deve ser dada ao estado nutricional das plantas. Incrementos na concentração de NaCl na solução do solo prejudicam a absorção radicular de nutrientes, principalmente de K e Ca, e interferem nas suas funções fisiológicas (Zhu, 2001; Yoshida, 2002). Então, a habilidade dos genótipos de plantas em manter altos teores de K e Ca e baixos níveis de Na dentro do tecido é um dos mecanismos chaves que contribui para expressar a maior tolerância à salinidade. Na maioria dos casos, genótipos tolerantes à salinidade são capazes de manter altas relações K/Na nos tecidos (Mansour, 2003; Zeng et al., 2003). Pelo aumento da absorção de K e consequente redução da absorção de Na, o K contribui para manter a relação K/Na alta na planta conforme constatado em plantas de pimentão (Rubio et al., 2003). A habilidade dos genótipos de excluir Na da raiz é uma

Tabela 8. 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)	Nome	Nome científico	CEes (dS m ⁻¹)
Abacate	<i>Persea americana</i>	1,3	Damasqueiro	<i>Prunus armeniaca</i>	1,6
Abobrinha	<i>Cucumis sativus</i>	2,5	Elimo	<i>Elymus triticoides</i>	2,7
Abobrinha	<i>Cucurbita pepo melopepo</i>	3,2	Ervilha	<i>Pisum sativum L.</i>	2,5
Abobrinha italiana	<i>Cucurbita pepo melopepo</i>	4,7	Espinafre	<i>Spinacia oleracea</i>	2,0
Aipo, salsão	<i>Apium graveolens</i>	1,8	Feijão fava	<i>Vicia faba</i>	1,6
Alface	<i>Lactuca sativa</i>	1,3	Feijoeiro	<i>Phaseolus vulgaris</i>	1,0
Alfafa	<i>Medicago sativa</i>	2,0	Festuca	<i>Festuca elatior</i>	3,9
Algodoeiro	<i>Gossypium hirsutum</i>	7,7	Figo	<i>Ficus carica</i>	2,5
Ameixa	<i>Prunus domestica</i>	1,5	Framboesa	<i>Rubus idaeus</i>	1,0
Amêndoa	<i>Prunus dulcis</i>	1,5	Laranja	<i>Citrus sinensis</i>	1,7
Amendoim	<i>Arachis hypogaea</i>	3,2	Limão	<i>Citrus limon</i>	1,7
Amoreira	<i>Rubus ursinus</i>	1,5	Linho	<i>Linum usitatissimum</i>	1,7
Amoreira preta	<i>Rubus spp,</i>	1,5	Maçã	<i>Malus sylvestris</i>	1,7
Arroz	<i>Oryza sativa</i>	3,0	Melão cantaloupe	<i>Cucumis melo</i>	2,2
Azeitona	<i>Olea europaea</i>	2,7	Milho doce	<i>Zea mays</i>	1,7
Azevém	<i>Lolium perenne</i>	5,6	Milho forrageiro	<i>Zea mays</i>	1,8
Batata	<i>Solanum tuberosum</i>	1,7	Milho grão	<i>Zea mays</i>	1,7
Batata doce	<i>Ipomoea batatas</i>	1,5	Morango	<i>Fragaria spp,</i>	1,0
Beterraba	<i>Beta vulgaris</i>	4,0	Nabo	<i>Brassica rapa</i>	0,9
Beterraba açucareira	<i>Beta vulgaris</i>	7,0	Noz	<i>Junglans regia</i>	1,7
Brócolis	<i>Brassica oleraceae botrytis</i>	2,8	Pêra	<i>Pyrus communis</i>	1,5
Cana de açúcar	<i>Saccharum officinarum</i>	1,7	Pêssego	<i>Prunus pérsica</i>	1,7
Capim bermuda	<i>Cynodon dactylon</i>	6,9	Pimentão	<i>Capsicum annuum</i>	1,5
Capim doce	<i>Phalaris tuberosa</i>	4,6	Pomelo (grapefruit)	<i>Citrus paradisi</i>	1,8
Capim dos pomares	<i>Dactylis glomerata</i>	1,5	Rabanete	<i>Raphanus sativus</i>	1,2
Capim mimoso	<i>Eragrostis spp,</i>	2,0	Repolho	<i>Brassica oleracea capitata</i>	1,8
Capim sudão	<i>Sorghum sudanense</i>	2,8	Romã	<i>Punica granatum</i>	2,5
Cártamo	<i>Carthamus tinctorius</i>	5,3	Sesbânia	<i>Sesbania exaltata</i>	2,3
Caupi	<i>Vigna unguiculata</i>	1,3	Soja	<i>Glycine Max</i>	5,0
Cebola	<i>Allium cepa</i>	1,2	Sorgo	<i>Sorghum bicolor</i>	4,0
Cenoura	<i>Daucus carota</i>	1,0	Tamareira	<i>Phoenix dactylifera</i>	4,0
Cevada (forragem)	<i>Hordeum vulgare</i>	6,0	Tomateiro	<i>Lycopersicon lycopersicum</i>	2,5
Cevada (grão)	<i>Hordeum vulgare</i>	8,0	Trigo	<i>Triticum aestivum</i>	6,0
Cornichão	<i>Lotus uliginosus</i>	2,3	Vagem	<i>Phaseolus vulgaris L.</i>	1,5
Couve-flor	<i>Brassica oleracea</i>	2,5	Videira	<i>Vitis spp.</i>	1,5

importante característica da planta, contribuindo para aumentar a relação K/Na e expressar a alta tolerância aos sais (Yoshida, 2002; Zhu, 2002).

Como a aplicação de fertilizantes aumenta a concentração de nutrientes no solo, alguns autores têm afirmado que a aplicação de fertilizantes em quantidade maior do que a quantidade recomendada traria benefícios em condições de salinidade moderada, pois haveria maior absorção de nutrientes, aumentando as relações K/Na, Ca/Na e NO_3/Cl (Cuatero & Muñoz, 1999).

O aumento da absorção de K, e consequente redução da absorção de Na, contribuiu para manter a relação K/Na mais alta em plantas de pimentão (Rubio et al., 2003) e espinafre (Chow et al., 1990).

Com relação à relação NO_3/Cl , o aumento na concentração de NaCl na solução nutritiva promoveu redução nos teores foliares de NO_3 em plantas de tomate, e não teve efeito sobre os teores de K, apesar do aumento dos teores de Na nas folhas (Phills et al., 1979). Pessarakli e Tucker (1988) verificaram que sob baixas concentrações de NaCl na solução nutritiva a absorção de N não foi afetada, porém esta foi reduzida em 70% sob altos níveis de salinidade. A inibição da absorção de nitrato pode ocorrer devido à interação NO_3/Cl nos sítios de absorção ou à despolarização da membrana pelo Na (Suhayda et al., 1990), o que tem sido associado à inibição não-competitiva de absorção de NO_3 (Hawkins e Lewis, 1993).

Além do N e do K, outros íons também podem conferir certo grau de tolerância das culturas à salinidade. A aplicação de Si em plantas de moringa cultivadas em solução nutritiva elevou os teores foliares de K e Ca e reduziu os de Na e Cl; entretanto, não se observou redução nos efeitos depressivos do NaCl sobre a produção de matéria seca das folhas, caule e raízes (Miranda et al., 2002). Por outro lado, Matoh et al. (1986) demonstraram que o Si promove aumento do teor de K e da relação K/Na nas folhas em arroz e da produção de matéria seca em cevada.

Apesar dessas evidências, existem controvérsias sobre o aumento da tolerância das culturas à salinidade pelo aumento da adubação. Em extensa revisão bibliográfica sobre os efeitos de doses de nutrientes na tolerância de culturas à salinidade, Grattan e Grieve (1999) verificaram que muitos estudos têm sido conduzidos com o solo ou o substrato deficiente em N, P e/ou K. Com isso, os efeitos benéficos de altas doses de nutrientes não implicam em aumento da tolerância das culturas à salinidade, uma vez que as culturas respondem positivamente aos níveis crescentes de fertilizantes mesmo nos tratamentos não-salinos. Plantas que se desenvolvem em solos férteis podem parecer mais

tolerantes aos sais em relação àquelas que crescem em solos deficientes, pois a fertilidade é o principal fator limitante do crescimento; então, a adição de fertilizante extra não alivia a inibição do desenvolvimento causada pela salinidade (Rhoades et al., 2000). De fato, algumas pesquisas têm demonstrado que a aplicação de fertilizantes não resultam em aumento da tolerância à salinidade de algumas culturas. Blanco et al. (2008a, 2008b) utilizaram água de irrigação de alta salinidade na irrigação do tomateiro em ambiente protegido e verificaram, nas folhas, aumento da relação N/Cl com as doses de N, e da concentração de K e prolina (aminoácido relacionado à tolerância das plantas à salinidade) com as doses de K. Entretanto, os efeitos da salinidade não foram aliviados e a produtividade não foi alterada, demonstrando que o aumento na dose de fertilizantes aplicados não conferiu maior tolerância do tomateiro à salinidade. Resultados apresentados por Tabatabaei e Fakhrzad (2008) demonstram aumento na relação K/Na em folhas de azevem somente quando compararam plantas que receberam nitrato de potássio com plantas que não receberam (condição de deficiência em K); já na presença de doses crescentes desse fertilizante, não houve aumento de K/Na nas folhas do azevem, corroborando com a afirmação de Rhoades et al. (2000).

Com base nessa discussão, nota-se que ainda há controvérsias sobre a eficiência da aplicação de nutrientes em excesso visando aumentar a tolerância das culturas à salinidade. De qualquer forma, é fato que plantas bem nutridas toleram mais à salinidade do que plantas submetidas à deficiência de algum nutriente e, portanto, é importante que haja um programa eficiente de manejo do solo e da adubação para que a convivência com a salinidade seja possível.

De acordo com Munns e James (2003), o mecanismo de exclusão de Na correlaciona-se muito bem com a tolerância em genótipos de trigo tetraplóide. Em plantas de *Arabidopsis thaliana* (Elphick et al., 2001) e yeast (Almagro et al., 2001), foram observados elevadas sensibilidade à NaCl sendo associada com a habilidade deficiente dos genótipos no sistema de efluxo de Na. O 'screening' em genótipos de plantas para alta tolerância ao estresse salino as relações K/Na e Na/Ca e a concentração de Na nos tecidos, entretanto, são parâmetros usados constantemente para diferentes espécies cultivadas (Munns e James, 2003).

Ajuste osmótico

As plantas tolerantes à salinidade são designadas como plantas halófitas e podem necessitar cerca de 15 g L^{-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 acumula em suas folhas para estabelecerem 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 e 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 e 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 se recuperem, 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.

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.

Sinalização bioquímica e melhoramento genético

Já se pode conseguir cultivares de espécies de plantas originalmente sensíveis à salinidade mais tolerantes aos sais.

A resposta das plantas aos estresses abióticos, nos quais inclui-se o estresse salino, envolve uma série de reações bioquímicas, que são reguladas por genes específicos. Para entender completamente a resposta biológica das plantas à salinidade, é preciso entender os mecanismos pelos quais as plantas “percebem” os sinais de estresse do meio e como elas respondem a esses sinais, através da transmissão de sinais às células, os quais ativarão os mecanismos de resposta adaptativa da planta.

De acordo com Xiong et al. (2002), de um modo geral, a transcrição de um sinal começa com a percepção, seguido da geração de mensageiros secundários (fosfatos, inositol, dentre outras). Esses mensageiros secundários podem alterar as concentrações intracelulares de Ca, iniciando várias fosforilações de proteínas que, no final, resultam na síntese de proteínas diretamente envolvidas na proteção celular ou em fatores de transcrição que controlam grupos específicos de genes reguladores de estresse. Os produtos desses genes podem participar da geração de moléculas reguladoras, como o ácido abscísico (ABA), etileno e ácido salicílico. Um desses genes é o SOS1 (Wu et al., 1996), um gene altamente sensível ao Na e o responsável pelo fluxo Na^+/H^+ que ocorre pela membrana celular, regulando, assim, a concentração de Na no interior das células (Shi et al., 2000).

O avanço no conhecimento dos processos bioquímicos envolvidos na tolerância das plantas à salinidade possibilitam a inserção de novos genes ao código genético desses organismos, dando origem às variedades transgênicas tolerantes à salinidade. Pela introdução do gene AtNHX1 tem-se obtido aumento considerável na tolerância à salinidade do milho (Yan et al., 2004), tomate (Zhang e Blumwald, 2001), festuca alta (Tian et al., 2006), dentre outras.

Toxidez

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.

REFERÊNCIAS

- Almagro, A., Prista, C., Benito, B., Loureiro Dias, M.C., Ramos, J. Cloning and expression of two genes coding for sodium pumps in the salt-tolerant yeast *Debaryomyces hansenii*. *Journal of Bacteriology*, v.183, p.3251-3255, 2001.
- Ayers, R. S. Quality of water for irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE*, v.103, n.1R2, p.135-154, 1977.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. A qualidade da água na agricultura. 2. ed. Campina Grande: UFPB. 1999. 153p. Estudos da FAO Irrigação e Drenagem, 29
- Berstein, L. Crop growth and salinity. In: *Drainage for Agriculture*. van J. Schilfgaard. *Agronomy Journal* 17, p.39-54, 1974.
- Blanco, F. F.; Folegatti, M. V. Doses de N e K no tomateiro sob estresse salino: III. Produção e qualidade de frutos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.2, p.122-127, 2008.
- Blanco, F. F.; Folegatti, M. V. Doses de N e K no tomateiro sob estresse salino: I. Concentração de nutrientes no solo e na planta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.1, p.26-33, 2008.
- Bresler, E.; McNeal, B. L.; Carter, D. L. Saline and sodic soils - Principles-Dynamics-Modeling. Springer-Verlag, New York, 1982. 236p.
- Cabanero, F. J., Martinez, V., Carvajal, M. Does calcium determine water uptake under saline conditions in pepper plants, or is it water flux, which determines calcium uptake. *Plant Science*, v.166, p.443-450, 2004.
- Chow, W. S.; Ball, M. C.; Anderson, J. M. Growth and photosynthetic responses of spinach to salinity: implications of K⁺ nutrition for salt tolerance. *Australian Journal of Plant Physiology*, v.17, p.563-578, 1990.
- Cuartero, J.; Muñoz, R. F. Tomato and salinity. *Scientia Horticulturae*, v.78, n.1/4, p.83-125, 1999.
- Elphick, C. H.; Sanders, D.; Maathuis, F. J. M. Critical role of divalent cations and Na efflux in *Arabidopsis thaliana* salt tolerance. *Plant Cell Environment*, v.24, p.733-740, 2001.
- Grattan, S. R.; Grieve, C. M. Salinity-mineral relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, v.78, p.127-157, 1999.
- Hawkins, H. J.; Lewis, O. A. M. Effect of NaCl salinity, nitrogen form, calcium and potassium concentration on nitrogen uptake and kinetics in *Triticum aestivum* L. cv. Gametoos. *The New Phytologist*, v.124, n.1, p.171-177, 1993.
- Kramer, P. J. 1983. Water relations of plants. New York: Academic Press, Inc. 489p.
- Lauchi, A.; Epstein, E. Mechanisms of salt tolerance in plants. *California Agriculture*, v. 38, n.10, p.18-21. 1984.
- 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.; Nielsen, D. R. Salinity Effects on Yolo Loam Hydraulic Properties. *Soil Science*, v.150. 1990.
- Maas, E. V. Crop Tolerance. *California Agriculture*, v.36, n.10, p.20-21, 1984.
- Maas, E. V.; Hoffman, G. J. Crop salt tolerance - Current assessment. *Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE*. v.103, n. 1R2, p.115-134.1977.
- Mansour, M. M. F. 2003. Transport proteins and salt tolerance in plants. *Plant Science*, v.164, p.891-900, 2003.
- Miranda, J. R. P.; Carvalho, J. G.; Santos, D. R.; Freire, A. L. O.; Bertoni, J. C.; Melo, J. R. M.; Caldas, A. L. Silício e cloreto de sódio na nutrição mineral e produção de matéria seca de plantas de moringa (*Moringa oleifera* LAM.). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, n.4, p.957-965, 2002.
- Motoh, T.; Kairusmee, P.; Takahashi, E. Salt-induced damage to rice plants and alleviation effect of silicate. *Soil Science and Plant Nutrition*, v.32, n.2, p.295-304, 1986.
- Munns, R. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Environment*, v.25, p.239-250, 2002.
- Munns, R.; James, R. A. Screening methods for salinity tolerance: a case study with tetraploid wheat. *Plant Soil*, v.253, n.02, p.201-218, 2003.
- Navarro, J. M.; Garrido, C.; Martinez, V.; Carvajal, M. Water relations and xylem transport of nutrients in pepper plants grown under two different salts stress regimes. *Plant Growth Regulators*, v.41, p.237-245, 2003.
- Pessaraki, M.; Tucker, T. C. Dry matter yield and nitrogen-15 uptake by tomatoes under sodium chloride stress. *Soil Science Society of America Journal*, v.52, n.3, p.698-700, 1988.
- Phills, B. R.; Peck, N. H.; MacDonald, G. E.; Robinson, R. W. Differential response of *Lycopersicon* and *Solanum* species to salinity. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v.104, n.3, p.349-352, 1979.
- Reed, D. W. Combating poor water quality with water purification systems. In: Reed, D.W. (ed.). *Water, Media and Nutrition for Greenhouse Crops*. Illinois: USA, Ball Publishing, 1996, p.51-67.
- Rhoades, J. D.; Kandiah, A.; Mashali, A. M. Uso de águas salinas para produção agrícola. Campina Grande: UFPB, 2000. 117p. Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 48
- Rubio, F.; Flores, P.; Navarro, J. M.; Martinez, V. Effects of Ca²⁺ K⁺ and cGMP on Na⁺ uptake in pepper plants. *Plant Science*, v.165, p.1043-1049, 2003.
- Russo, D.; Bresler, E. Soil-water-suction relationships as affected by soil solution composition and concentration. p.287-296. In: Banin, A.; Kafkafi, U. (ed.). *Agrochemicals in Soils*. New York: Pergamon Press. 1980. 448p.
- Shannon, M. C.; Grieve, C. M. Tolerance of vegetable crops to salinity. *Science Horticulture*, v.78, p.5-38, 1999.
- Shi, H.; Ishitani, M.; Kim, C.; Zhu, J. K. The *Arabidopsis thaliana* salt tolerance gene *SOS1* encodes a putative Na⁺/H⁺ antiporter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.97, n.12, p.6896-6901, 2000.
- Sousa, M. R. de. Comportamento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. CV Eriparza) submetido a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação. Lavras: UFLA. 1995. 94p. Dissertação Mestrado

- Suhayda, C. G.; Giannini, J. L.; Briskin, D. P. Electrostatic changes in *Lycopersicon esculentum* root plasma membrane resulting from salt stress. *Plant Physiology*, v.93, n.2, p.471-478, 1990.
- Tabatabaei, S. J.; Fakhrzad, F. Foliar and soil application of potassium nitrate affects the tolerance of salinity and canopy growth of perennial ryegrass (*Lolium perenne* var Boulevard). *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, v.3, n.3, p.544-550, 2008.
- Tester, M.; Davenport, R. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Annals of Botany*, v.91, n.5, p.503-527, 2003.
- Tian, L.; Huang, C.; Yu, R.; Liang, R.; Li, Z.; Zhang, L.; Wang, Y.; Zhang, X.; Wu, Z. Overexpression AtNHX1 confers salt-tolerance of transgenic tall fescue. *African Journal of Biotechnology*, v.5, n.11, p.1041-1044, 2006.
- 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.
- Wu, S. J.; Ding, L.; Zhu, J. K. SOS1, a genetic locus essential for salt tolerance and potassium acquisition. *The Plant Cell*, v.8, n.4, p.617-627, 1996.
- Xiong, L.; Schumaker, K. S.; Zhu, J. K. Cell signaling during cold, drought, and salt stress. *The Plant Cell*, v.14, p.S165-S183, 2002. suplemento.
- Yan, Y. X.; Fang, Y. A.; Wei, Z. K.; Ren, Z. J. Production and analysis of transgenic maize with improved salt tolerance by the introduction of AtNHX1 gene. *Acta Botanica Sinica*, v.46, n.7, p.854-861, 2004.
- Yoshida, K. Plant biotechnology genetic engineering to enhance plant salt tolerance. *Journal Bioscience Bioengineering*, v.94, n.4, p.585-590, 2002.
- Zeng, L., Poss, J., Wilson, C., Draz, A. S. E., Grieve, C. M. Evaluation of salt tolerance in rice genotypes by physiological characters. *Euphytica*, v.129, p.281-292, 2003.
- Zhang, H. X.; Blumwald, E. Transgenic salt tolerant tomato plants accumulate salt in the foliage but not in the fruits. *Nature Biotechnology*, v.19, n.8, p.765-768, 2001.
- Zhu, J. K. Plant salt tolerance. *Trends in Plant Science*, v.6, p.66-71, 2001.
- Zhu, J. K. Salt and drought stress signal transduction in plants. *Annual Review of Plant Biology*, v.53, p.247-273, 2002.