

9 INTERAÇÕES SALINIDADE E FERTILIDADE DO SOLO

Rivaldo Vital dos Santos e Takashi Muraoka

9.1 INTRODUÇÃO

O termo “fértil” é definido como “frutífero” e “prolífico”. Na realidade, na Ciência do Solo a fertilidade é sinônimo de disponibilidade de nutrientes às plantas em quantidades suficientes, de modo que a produção agrícola não seja prejudicada. Costuma-se definir solo fértil como aquele que contém quantidades suficientes e balanceadas de todos os nutrientes em formas assimiláveis. Além disso, devem estar livres de substâncias tóxicas e possuir propriedades físicas e químicas satisfatórias. Nesse contexto, fica evidenciado que o solo pode ser bem suprido em nutrientes sob a forma disponível e ser infértil, pois outros fatores limitam o desenvolvimento vegetal. Por exemplo, os solos salinos, sódicos ou salino-sódicos contém elevada concentração de nutrientes, no entanto, por apresentarem altos conteúdos de sais solúveis ou de sódio trocável não são produtivos. Pode-se afirmar que esses solos tem elevada fertilidade química. A alta condutividade elétrica dos solos salinos elevam o potencial osmótico da solução do solo e restringe a absorção de nutrientes pelas plantas. Quanto ao solo salino-sódico, além do efeito citado, apresenta íon Na^+ que provoca deterioração física do solo. Já os solos sódicos, devido a predominância de sódio trocável no complexo sortivo, apresentam propriedades químicas e físicas com efeitos negativos no solo, tais como a toxicidade de íons, restrição na decomposição da matéria orgânica e na disponibilidade de nutrientes e, portanto, na produção vegetal.

Nesse capítulo será enfatizado o efeito do excesso de sais e de sódio trocável nas propriedades químicas e físicas do solo, sua interação com a fertilidade do solo e em especial sua influência na nutrição mineral e na produção de culturas.

Quando o crescimento vegetal é limitado por outros fatores que não seja a disponibilidade de nutrientes, a eficiência no uso de fertilizantes é reduzida. Mas os solos com problemas salinos, comuns em regiões áridas e semi-áridas, apresentam limitações químicas específicas e sua correção e aplicação de nutrientes é indispensável à produção agrícola.

9.2 SALINIDADE, SODICIDADE E AS PROPRIEDADES DO SOLO

A fertilidade do solo é grandemente afetada pelas condições salinas. Quanto a influência da concentração excessiva de sais solúveis destaca-se seu efeito no aumento da condutividade elétrica e na concentração de ânions, tais como cloretos, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos e boratos, na solução do solo. Sob condições sódicas um outro agravante é a presença de elevado pH (> 8,5). Tais condições podem originar toxidez ou provocar deficiências nutricionais às plantas. A compreensão da dinâmica desses íons, assim como da reação do solo é indispensável para que se possa deixar o solo com a

concentração de nutrientes em quantidade suficiente e equilibrada, ou se possa adicionar àqueles que estão em concentrações muito baixas.

Além de influir nas propriedades químicas, as condições salinas, especificamente o excesso de íons de sódio, provocam alterações nas propriedades físicas do solo. O elevado poder dispersante do sódio reduz a floculação e a estabilidade dos agregados do solo, reduzindo sua porosidade e a capacidade de retenção e de infiltração de água no solo. O acúmulo de matéria orgânica em solos sódicos é outra característica marcante.

As propriedades químicas e físicas existentes nos solos afetados por sais restringem a disponibilidade de nutrientes para as plantas e, portanto, a fertilidade do solo. A adoção de práticas de manejo nesses solos exige a compreensão da intensidade da interação salinidade-sodicidade-fertilidade; só assim pode-se deixar esses solos economicamente viáveis à exploração agrícola.

9.2.1 Potencial osmótico

A osmose corresponde a um processo pelo qual a água, e não os sais, passam através de uma membrana semi-permeável de uma solução menos concentrada para outra com maior teor de sais. A concentração excessiva de sais na solução do solo diminui a energia livre da água, reduzindo sua absorção pelas plantas.

O principal efeito dos sais é osmótico, já que o alto nível de sais no solo dificulta a absorção de água pelas plantas. As plantas apresentam uma membrana semi-permeável que permite a passagem de água, mas evita a passagem de sais. Quanto mais salina a água, mais osmoticamente difícil é de extraí-la da solução do solo.

Há necessidade de eliminar das áreas salinas o excesso de sais solúveis. O manejo dos solos salinos deve considerar prioritariamente o balanço de sais na área. Deve-se ter em mente que a quantidade de sais que sai da área deve ser maior ou igual àquela que entra, de modo que a CE do extrato de saturação seja, no mínimo 4 dS.m^{-1} , ou 2 dS.m^{-1} segundo conceito mais recente (Bohn, 1985). A quantidade de água a ser aplicada para reduzir a concentração de sais a um nível tolerável é calculada através da necessidade de lixiviação (NL). A alternativa é manter o excesso de sais precipitados, e assim, inativos com relação às plantas. Apesar das plantas desenvolverem-se normalmente quando os sais estão precipitados deve-se atentar para que isso não conduza a condições sódicas ou a desequilíbrios nutricionais. Entre os manejos, o mais recomendável é a eliminação do excesso de sais solúveis, aplicando-se uma lâmina de água de boa qualidade.

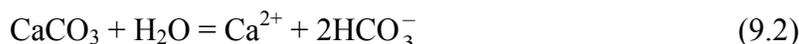
9.2.2 Reação do solo

A reação dos solos sob condições salinas é variável. Os solos salinos tendem a apresentar reação salina levemente alcalina ou ácida, normalmente tem $\text{pH} < 8,5$. Quanto aos solos salino-sódicos, apresentam $\text{pH} \cong 8,5$; já nos solos sódicos o pH é superior a 8,5. Se bem que em alguns solos sódicos o pH pode ser inferior a 6,0, sendo denominados de solodi.

A reação desses solos durante muito tempo tem sido expressa por sua alcalinidade, ou seja, pela diferença entre a concentração total de cátions e a concentração total de ânions. Como nos solos com excesso de sais e de sódio os ânions dominantes são o carbonato, o bicarbonato e a hidróxila, sua alcalinidade (Alc) é expressa por:

$$Alc = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [OH^-] - [H^+] \quad (9.1)$$

Os colchetes denotam concentração molar. Dessa forma, a elevação de pH é acompanhada pelo aumento na concentração de carbonatos como ocorre no intemperismo de carbonatos sob a influência de CO₂:



Assim, a elevação da pressão parcial de CO₂ aumenta o pH do sistema. Em solos sódicos, devido à elevada concentração de carbonatos e bicarbonato de sódio, o pH situa-se em torno de 10.

Solos ricos em CaCO₃ tem frequentemente pH próximo a 8,0. Sob tais condições, o pH da pasta saturada varia de 7,1, em solos altamente salinos a 8,2 em solos não salinos. Medições do pH em suspensão solo:água (1:2) revelam pH de 7,6 para solos altamente salinos e, em torno de 8,5 - 8,6 em solos não salinos. O acúmulo de sais reduz o pH em solos salinos, mas em solos sódicos, o pH aumenta com a elevação da salinidade, devido a presença de altas concentrações de íons carbonato e bicarbonato de sódio.

A diluição da suspensão solo-água também aumenta o pH. A diferença do pH entre o extrato de saturação e a suspensão solo:água de solos sódicos ou salino sódicos aproxima-se de uma unidade de pH em solos com baixa salinidade, e de 0,2 a 0,4 unidades de pH em solos altamente salinos. A Figura 9.1 apresenta a variação do pH e da condutividade elétrica em extratos obtido da pasta saturada e de suspensão solo:água (1:2).

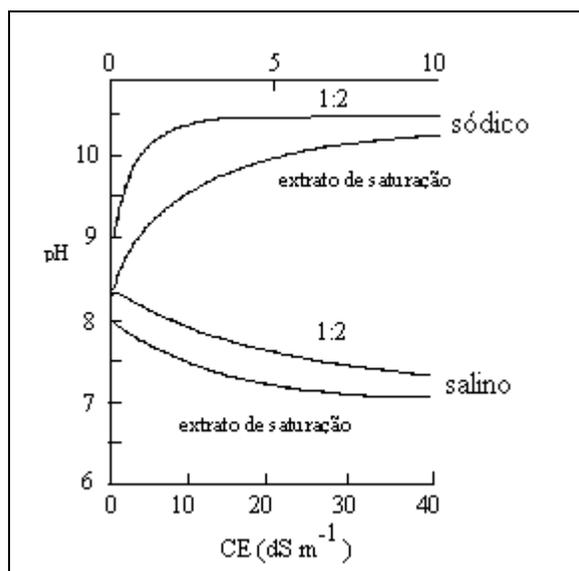


Figura 9.1 Efeito da diluição e de sais solúveis na alteração do pH em solos salino-sódicos e sódicos (Gupta & Abrol, 1990).

Apesar do maior valor de pH nas suspensões solo:água, têm-se observado menor al- calinidade em extratos aquosos, quando comparado com os valores do extrato de saturação. Esse paradoxo pH-alcalinidade foi associado com o equilíbrio cálcio-carbonato (Lindsay,1979). No sistema carbonato de cálcio (H₂O - CO₂ - CaCO₃), a relação entre PCO₂ e pH tem sido representada pela Equação 9.1 ou 9.2:

$$\text{pH} = 5,983 - 2/3 \log (\text{PCO}_2) + 1/3 \log(\gamma\text{H}_2\text{CO}_3) - 1/3 \log (\gamma\text{Ca}^{2+}) \quad (9.4)$$

$$\log (\text{PCO}_2) = 8,975 - 1,5 \text{ pH} + 1/2 \log (\gamma\text{HCO}_3^-) - 1/2 \log (\gamma\text{Ca}^{2+}) \quad (9.5)$$

onde γ refere-se ao coeficiente de atividade do íon. A relação entre pH e alcalinidade (alcalinidade do carbonato) pode ser estabelecida pela substituição dos valores de CO₃⁼ e HCO₃⁻ nos termos da Equação 9.5,

$$2 \text{ CO}_3^{=} + \text{HCO}_3^- = \text{PCO}_2 \left(\frac{2.10^{-18,75}}{a^2 H^+ \cdot \gamma\text{CO}_3^{2-}} + \frac{10^{-7,82}}{a H^+ \cdot \gamma\text{CO}_3^-} \right) \quad (9.6)$$

Substituindo a Equação 9.5 em 9.6, obtém-se uma relação que sugere que o aumento na PCO₂ poderia reduzir o pH e aumentar a alcalinidade do carbonato. Dessa forma parece que o paradoxo pode ser devido a queda na PCO₂ com o aumento da relação solo:água e perda do H₂CO₃ durante a extração a vácuo da amostra.

Quanto a relação entre sodicidade e pH, verifica-se que o alto valor de pH sob tais condições é causado pela presença de minerais de carbonato e bicarbonato de sódio em solos sódicos ou salino-sódicos, os quais precipitam os carbonatos de cálcio e magnésio durante a evaporação e conduz a um aumento da RAS da solução do solo. Uma íntima relação entre pH e sodicidade (RST) foi verificada em solos sob condições de alcalinidade. Gupta et al. (1981) desenvolveram uma relação de dependência do pH simultaneamente com o complexo de troca Na⁺ e Ca²⁺ + Mg²⁺ e o equilíbrio da calcita em solos sódicos a salino-sódicos (pH > 7,0). A relação é expressa por,

$$\log \text{RST} = \text{pH} - 5,2336 + 0,5 \log[\text{P}(\text{CO}_2)] + \log (\text{Na}^+) + 0,5\text{I}^{1/2} \quad (9.7)$$

onde RST refere-se a relação de sódio trocável (Na_T), conforme Equação 9.8, e I é a força iônica da solução do solo.

$$\text{RST} = \frac{\text{Na}_T}{\text{CTC} - \text{Na}_T} \quad (9.8)$$

A variação aproximada da PST correspondente ao pH do solo em pasta saturada do solo e em suspensões solo:água (1:2) é frequentemente observada sob condições de campo, conforme Tabela 9.1. Seu cálculo é feito pela Equação 9.9.

$$PST = \frac{Na_r}{CTC} 100 \quad (9.9)$$

Tabela 9.1 Dependência do pH na sodicidade do solo.

pH		PST		
pasta saturada	suspensão solo:água(1:2)	Chang & Dregne(1955)	Kovda (1965)	Abrol et al. (1980)
8,0-8,2	8,2-9,0	< 20	< 15	< 20
8,2-8,4	9,0-9,4	20-30	15-25	21-35
8,4-8,6	9,4-9,6	30-45	25-30	35-50
8,6-8,8	9,6-9,8	45-60	30-40	50-65
8,8-9,0	9,8-10,0	> 60	40-50	65-85
9,0-9,8	> 10,0	-	> 50	> 85

PST - Percentagem de Sódio Trocável.

Para estabelecer-se a metodologia de análises da fertilidade dos solos, a padronização do método de extração é de extrema importância, já que existem diferenças nos valores de pH e evidentemente, da concentração iônica de cátions mono e bivalentes quando se utiliza diferentes métodos de obtenção do extrato.

A manutenção do pH entre 6,0 e 6,5 em solos com condições salinas deve ser meta prioritária, já que essa propriedade química apresenta uma estreita relação com a disponibilidade de nutrientes (Figura 9.2), e assim com a fertilidade dos solos.

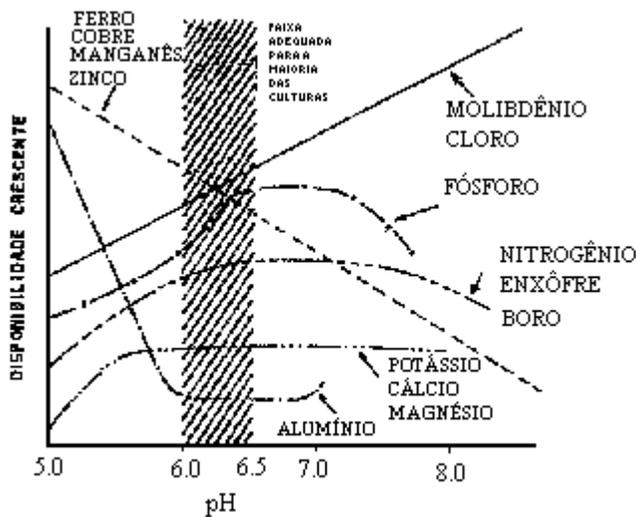


Figura 9.2 Gráfico ilustrativo do efeito do pH na disponibilidade de nutrientes.

9.2.3 Dispersão e floculação

A dispersão é um fenômeno típico de solos com excesso de sódio trocável. Os sistemas argilosos são dispersos devido a predominância de cargas negativas, de íons sódio e magnésio, e a reduzida concentração de eletrólitos. O alto raio hidratado do sódio e do magnésio e as forças repulsivas na dupla camada difusa explicam seus efeitos nesse processo. Devido a repulsão das partículas unitárias, a dispersão da argila resulta na formação de uma suspensão de partículas estáveis em água. Na dispersão de argilas típicas de solos sódicos, tais como a montmorilonita e a illita, predominam movimentos brownianos. Ao se aumentar a concentração de eletrólitos, as forças repulsivas são reduzidas, prevalecendo as forças de atração de Van der Waals. Sob tais condições, os sistemas floculam, permitindo a separação das fases sólida e líquida. O mínimo de eletrólitos para que esse processo ocorra é denominado de concentração de floculação crítica (CFC). Quirk & Schofield (1955) ilustram em um gráfico a complexidade da interrelação entre os fatores que influem na dispersão da argila: a curva da “concentração limiar”(Figura 9.3)

A dispersão e a floculação das argilas dependem da espessura da dupla camada difusa ao redor das partículas e, portanto da concentração de cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , etc) que estão próximos a sua superfície. Por influenciar na disponibilidade de nutrientes e em propriedades físicas do solo, tais condições, especialmente a dispersão de solos sódicos, podem restringir o crescimento vegetal.

O problema da floculação e da estabilidade dos agregados é muito importante nos solos. Os agregados estáveis (nos solos) apenas podem ser formados em solos que contém argila que flocularão. Se a argila permanece dispersa, o solo compacta-se.

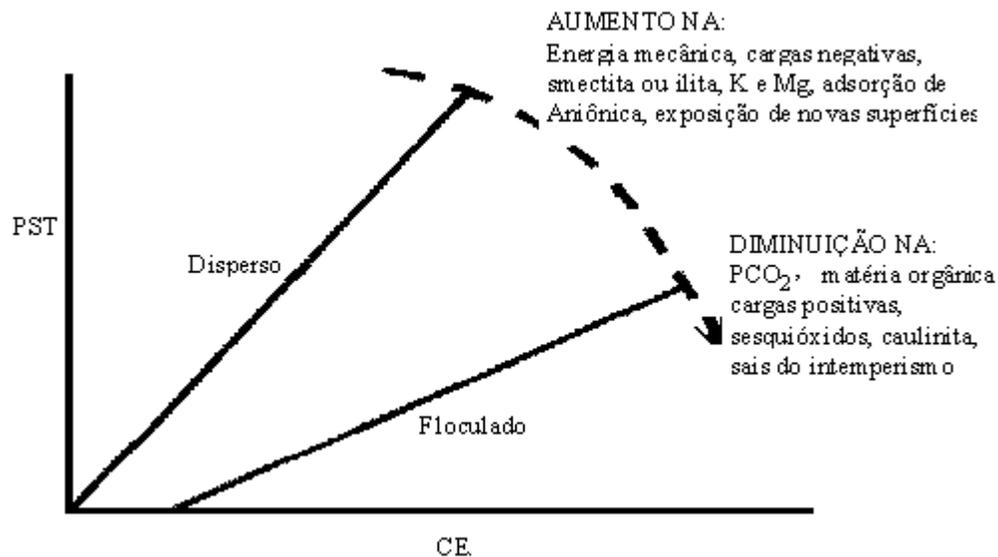


Figura 9.3 Fatores que afetam a curva da “concentração limiar” para separar solos dispersos de floculados.

Solos adensados são pegajosos quando úmidos e duros quando secos. O crescimento das raízes e a aeração dos solos requerem uma condição porosa. Caso a água da chuva promova a lixiviação dos eletrólitos do solo, as partículas de argila podem tornar-se dispersas. Tornando-se seco, o solo endurece e a compactação pode ocorrer.

Isso reduz a porosidade do solo, que inibe sua aeração, condição indispensável para o adequado crescimento radicular. Por outro lado, pode-se manter uma concentração de eletrólitos no solo que provoque floculação. Para alcançar tais condições pode-se aplicar gesso, CaCl_2 , H_2SO_4 ou calcário. O cálcio é conhecido por apresentar alto poder de floculação das partículas de argila com cargas negativas, melhorando as condições de fertilidade do solo.

9.2.4 Estabilidade dos agregados

Nos solos cultivados e úmidos, os agregados quebram-se originando microagregados que deslocam-se verticalmente no perfil, bloqueando a porosidade do solo, e originando camadas adensadas, o que restringe a taxa de infiltração da água no solo. No entanto, apenas o umedecimento do solo não reduz necessariamente sua fertilidade e produtividade. Se a umidade é seguida pela dispersão, observações no campo mostram que isso conduz, em muitos casos, a propriedades físicas indesejáveis, tais como, drenagem deficiente, superfície encrostada, endurecimento e difícil traficabilidade e trabalhabilidade do solo, o que eventualmente conduz a uma redução na fertilidade do solo e, portanto, na produção das culturas.

O nível baixo de salinidade ($< 0,3 \text{ dS m}^{-1}$) provoca expansão da argila, resultando em quebra dos agregados, adensamento e reduzida permeabilidade do solo. A alta salinidade reduz a expansão, a quebra dos agregados e a dispersão das partículas do solo, enquanto que a elevada sodicidade tem efeito oposto. Portanto, tanto a salinidade quanto a Relação de Adsorção de Sódio (RAS) tem sido considerada conjuntamente para avaliar o potencial de perigo da qualidade da água nas propriedades físicas do solo.

A Figura 9.4 mostra os possíveis mecanismos pelo qual a sodicidade pode afetar o comportamento físico do solo e sua fertilidade, com conseqüências negativas à produção agrícola.

Quando o solo hidrata-se após rápido umedecimento seguido pela dispersão, resulta na formação de camadas superficiais endurecidas com reduzida condutividade hidráulica. Isso por sua vez provoca redução na taxa de infiltração, redistribuição e evaporação da água no solo. Esses são os três processos fundamentais que determinam a velocidade de fluxo de água no subsolo, que é o maior determinante do crescimento e produção das culturas desenvolvidas nesse solo.

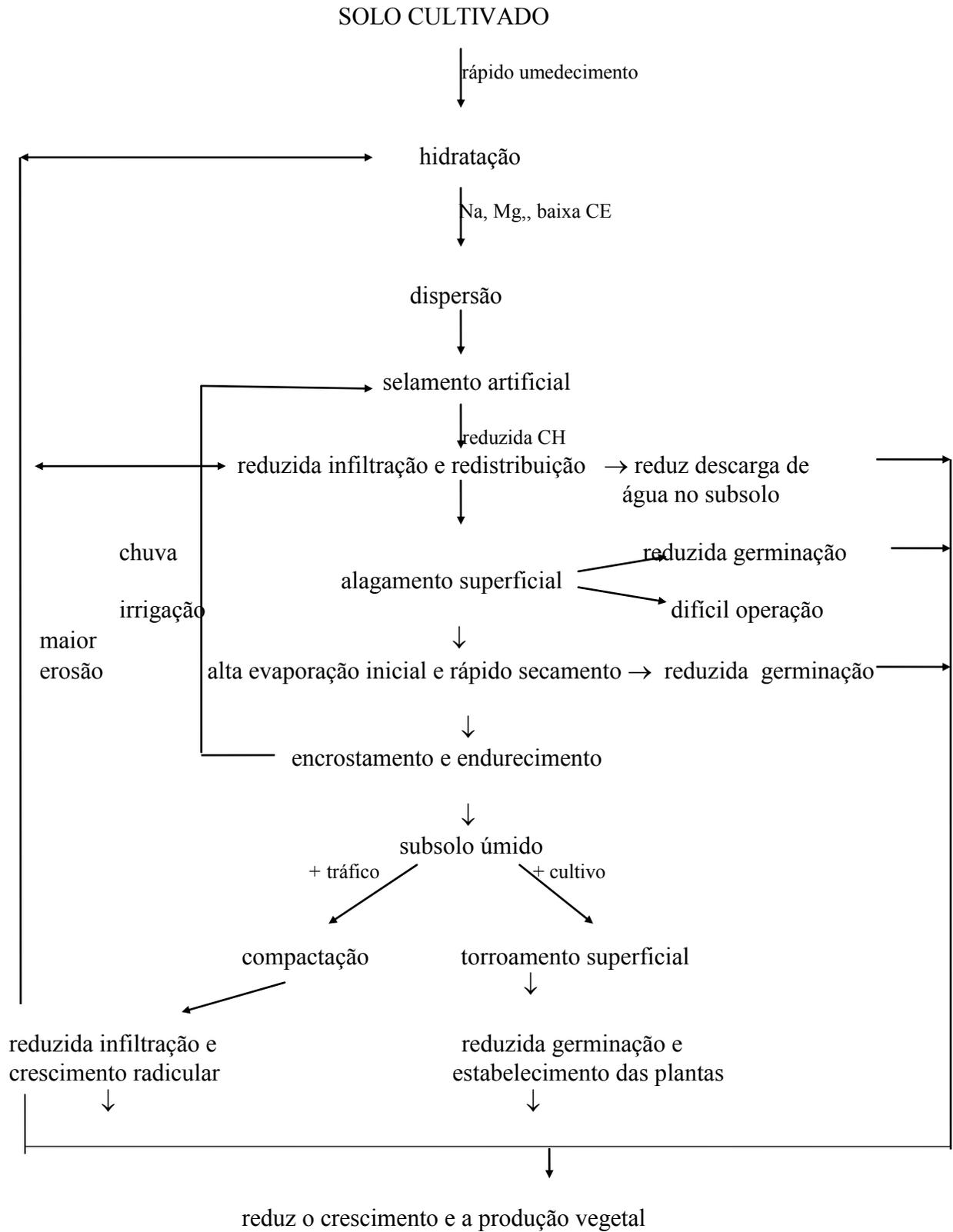


Figura 9.4 Modelo dos mecanismos do efeito do umedecimento e da dispersão nas propriedades físicas do solo (Adaptado de So & Aylmore, 1993).

Uma conseqüência da reduzida taxa de redistribuição ou da drenagem da superfície do solo, é a temporária saturação, que não é benéfica à germinação, e geralmente atrasa o preparo do solo. A saturação do solo está associada com a ausência de oxigênio necessário à respiração das sementes, as quais podem apresentar uma embebição excessiva, prejudicando o desenvolvimento adequado do embrião.

O elevado conteúdo de água durante o período de saturação na superfície são seguidos por uma elevada taxa de evaporação (estágio 1), similar a evaporação em uma superfície livre. No entanto, caso a condutividade hidráulica do solo seja muito baixa e incapaz de igualar-se à perda de água, a superfície seca rapidamente seguida pela contração e rachadura. Isso é limitado a poucos centímetros de espessura do perfil do solo. Ao contrário, se a condutividade hidráulica do solo é alta e a capacidade de contração do solo é limitada, tais como em solos com alto conteúdo de silte e areia, o secamento pode estender-se a uma maior profundidade do solo, resultando em seu endurecimento.

Tanto o encrostamento quanto o endurecimento de camadas do solo reduzem a emergência de plântulas.

A superfície encrostada ou endurecida representa uma camada “protetora” seca onde o movimento de água é lento e predominantemente na forma de vapor (estágio 2 de evaporação). Logo a taxa de evaporação é reduzida consideravelmente, resultando em uma velocidade de secamento mais lenta. Conseqüentemente o subsolo tende a permanecer úmido e torna-se susceptível a compactação. O tráfico de máquinas e o cultivo nesse momento resulta na compactação do subsolo e na excessiva formação de torrões, que é prejudicial à germinação de sementes. Os subsolos úmidos são também susceptíveis a compactação devido a pressão de argilas expandidas e/ou da sobrecarga do solo úmido.

A redução da quantidade de água no subsolo restringe também a dissolução de minerais e a disponibilidade de nutrientes na solução do solo, causando efeito também na fertilidade química do solo, provocando conseqüentemente significativa redução na produção das culturas. Além disso, a reduzida infiltração e o aumento no escoamento superficial, conjuntamente com a hidratação e a dispersão, aumentam as perdas do solo pela erosão.

O sódio reduz o processo de redistribuição e evaporação da água no perfil do solo, o que pode resultar em uma temporária inundação da superfície do solo, que prejudica a germinação das sementes devido a ausência de oxigênio. Essa condição também resulta em um período mais prolongado de umedecimento, dificultando as operações de manejo.

9.3 DINÂMICA DOS NUTRIENTES EM SOLOS SALINIZADOS

Em solos salinos as plantas são adversamente afetadas pela baixa absorção de água pelas raízes devido aos efeitos do potencial osmótico (Bernstein, 1975). Quando a salinidade é dada principalmente por cloreto de sódio, a toxicidade de íons também afeta a produtividade vegetal. Em solos sódicos, quando os sais são lixiviados abaixo de um certo limite crítico, o movimento da água é inibido e sua disponibilidade para as plantas é restringida. Além disso, quando o perfil do solo é inundado, condições anóxicas reduzem a fertilidade do solo, limitando o crescimento vegetal.

O delicado balanço de nutrientes é facilmente alterado em solos sódicos devido a adoção de práticas de manejo impróprias. O adequado manejo da fertilidade do solo é a chave para aumentar a produtividade em tais solos. O que se necessita é a condução de ensaios em solos sódicos relacionando a disponibilidade de nutrientes com as propriedades do solo afetada pela toxicidade, assim como a resposta de plantas aos nutrientes em menor disponibilidade no solo. Na escolha do fertilizante a ser aplicado, o conhecimento da reação do solo é um aspecto importante a ser considerado. Para a maioria dos solos sódicos deve-se optar por produtos de reação ácida. Compreender a química da solução do solo, os processos que afetam sua composição e a influência da matéria orgânica na disponibilidade de nutrientes são aspectos de extrema relevância.

9.3.1 Disponibilidade de nutrientes

Os solos sódicos e salino-sódicos apresentam degradação física e isso acarreta prejuízos quanto a disponibilidade de nutrientes. Abaixo são citadas as classes de solo sódico e os prejuízos mais comuns em sua fertilidade, conforme Rengasamy & Olsson (1991).

A) Solo Sódico Alcalino (pH > 8)

- a) toxicidade dos nutrientes Mo, B, Na (quando o pH > 9)
- b) deficiências de nutrientes Cu, Zn, Mn, Fe, Co, N, Mg, Ca (se pH > 9) e P (8,0 < pH < 8,5)
- c) efeitos físicos prejudiciais no subsolo saturado, pobre infiltração e pobre aeração

B) Solo Sódico Neutro (6 < pH < 8)

- a) toxicidade dos nutrientes Mo, B, Fe, Cu e Mn
- b) efeitos físicos prejudiciais: superfícies encrostadas, superfície e subsuperfície saturadas, condições anóxicas.

C) Solo Sódico Ácido (pH < 6)

- a) toxicidade de Fe, Mn, Al, Cu e Zn
- b) deficiências de Mo, P, Ca, Mg e K
- c) duripans em alguns solos

Desse modo, tanto a fertilidade química quanto a física dos solos, são afetadas pela sodicidade. Altas concentrações de sódio, alto pH, alto estresse osmótico e pobre aeração induzem muitos problemas de fertilidade química nos solos. A utilização de nutrientes via fertilizantes em solos sódicos é restrita. A grande maioria dos trabalhos refere-se a aplicação de corretivos e seus efeitos na melhoria das propriedades físicas do solo. A compreensão da dinâmica da solução do solo também é um aspecto importante para entender as reações químicas que se verificam nesses solos, e em que intensidade elas influem na disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Química da solução do solo sódico

A composição química de uma solução do solo é dinâmica (Figura 9.5) e determinada por um equilíbrio multifase envolvendo:

- a) a fase sólida, compreendendo minerais de argila, compostos inorgânicos amorfos e materiais orgânicos;
- b) uma fase líquida, representada pela água do solo;

- c) uma fase gasosa, compreendendo principalmente oxigênio e dióxido de carbono, e
- d) o complexo de troca.

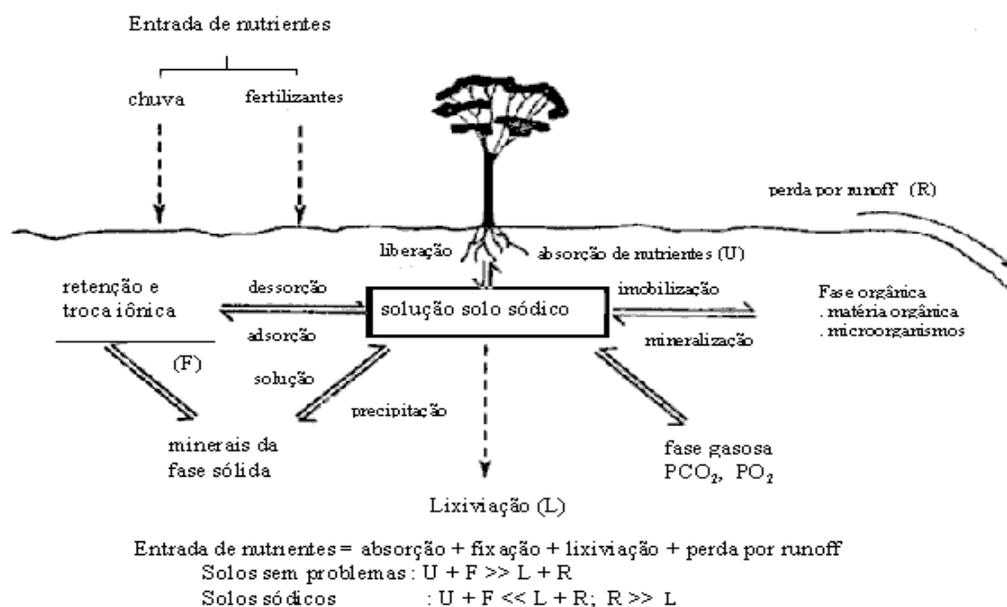


Figura 9.5 A dinâmica da química da solução do solo sódico.

O cloreto, carbonato, bicarbonato, sulfato, magnésio e sódio são os íons dominantes no extrato de solos sódicos. O cálcio, nesses solos, está presente em baixas quantidades e é geralmente um fator limitante tanto para a nutrição de plantas quanto para a estabilidade estrutural do solo. O potássio é também encontrado em baixas proporções, mas o constante suprimento de potássio é garantido na solução de solos sódicos devido a prevalência da ilita. O borato, nitrato e fosfato são encontrados em consideráveis quantidades na solução de alguns solos sódicos e água subterrânea.

Juntamente com os componentes do solo e do clima, o manejo do solo tal como a adição de gesso, calcário, matéria orgânica, o cultivo, a irrigação e o período que o solo fica exposto (sem proteção), também afetam os processos que ocorrem na solução do solo.

Quando não se aplica fertilizantes, os nutrientes são derivados principalmente dos produtos do intemperismo dos minerais primários e de argila e da decomposição da matéria orgânica. A liberação de nutrientes na solução do solo envolve vários mecanismos, entre os quais a troca iônica, a solubilização e precipitação, a formação de par iônico, a adsorção específica e a assimilação e excreção microbiológica. A assimilação e excreção microbiológica são importantes processos que podem afetar a concentração de nutrientes na solução do solo. As complexações com ligantes (quelação) são reações vitais que controlam a concentração de micronutrientes em solos.

Ânions como sulfato e carbonatos associam-se a cátions multivalentes e formam espécies não iônicas, reduzindo a atividade das espécies iônicas e a disponibilidade dos nutrientes. Tais complexos podem também reduzir a toxicidade de íons para as plantas. Por exemplo, a formação de par de íons de Al^{3+} com SO_4^{2-} reduzem a atividade de Al^{3+}

e sua toxicidade às raízes das plantas. Em solos sódicos os pares iônicos com carbonato, bicarbonato e sulfato reduzem a atividade de íons divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+}). Por isso a RAS calculado a partir da concentração iônica superestima seu valor.

Devido ao constante acúmulo de água em solos sódicos, estes apresentam reações de oxi-redução. O estado de redox do solo é descrito pela atividade dos elétrons livres, pE (isto é: $-\log(e^-)$, em conjunto com a atividade dos prótons (pH).

A pH 7 solos sub-óxicos tem um pE que varia de +2 a +7, enquanto solos anóxicos tem um pE < +2. Em solos sódicos o Fe, Mn, N, O, S e C são os nutrientes mais comuns que sofrem reações de oxi-redução, originando outras espécies (Tabela 9.2).

Na ausência de oxigênio tanto organismos facultativos quanto anaeróbios usam o Mn^{4+} , Fe^{3+} , NO_3^- e SO_4^{2-} nas reações de transferência de elétrons e produzem Mn^{2+} , Fe^{2+} , N_2 e S^{2-} . Essas reações podem aumentar a disponibilidade de nutrientes (Mn^{2+} , Fe^{2+}) para as plantas ou suas perdas (N_2 , S^{2-}). Embora comente-se que os íons Zn^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{2+} e MoO_4^{2-} sejam solúveis em solos pobremente drenados, o efeito do pH é dominante em solos sódicos alcalinos e causa a precipitação desses íons. Embora esses metais pesados possam ser solubilizados através da quelação por moléculas orgânicas, derivadas da decomposição anaeróbica da matéria orgânica, o estado de oxi-redução que ocorre em solos sódicos conduzem a sua complexação com a superfície sólida do solo e a sua indisponibilidade às plantas.

Tabela 9.2 Atividade dos elétrons (pE) a pH 7 para algumas reações químicas em solo sódico.

Reação Química	pE
$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	13,80
$2\text{NO}_3^- + 12\text{H}^+ + 10\text{e}^- \leftrightarrow \text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	12,66
$\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$	6,80
$\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ + \text{e}^- \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$	-3,13
$\text{SO}_4^{2-} + 10\text{H}^+ + 8\text{e}^- \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 3\text{H}_2\text{O}$	-3,13
$\text{CO}_2 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \leftrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	-4,14
$\text{N}_2 + 8\text{H}^+ + 6\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{NH}_4^+$	-4,69
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2$	-7,00

Nos solos com excesso d'água pode ocorrer também perdas de N por desnitrificação. Em solos com alto pH, por exemplo, os solos sódicos calcários, o N pode ser volatilizado na forma de NH_3 ou precipitado como $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$. A disponibilidade de N é muito reduzida sob essas condições quando a uréia é a fonte de N, devido a baixa atividade da urease a altos valores de pH (Nitant & Bhumbla, 1974). A disponibilidade de N em solos sódicos é problemática. Estudos são necessários para relacionar a influência da sodicidade nas transformações do N nesses solos.

A disponibilidade de fósforo é geralmente aumentada em solos alagados devido a redução de fosfatos férrico e a dissolução de outros fosfatos. O sódio trocável pode aumentar a dissociação de ânions orgânicos, os quais substituem o P dos fosfatos de Fe e Al. A alta disponibilidade de P em solos sódicos alcalinos indianos foi atribuído por

Gupta & Abrol (1990) aos altos níveis de pH, RAS e CO_3^{2-} . A aplicação de superfosfatos é uma prática comum em solos Australianos para aumentar sua absorção pelas plantas. Outros solos sódicos aluviais também apresentam alta concentração total de P, porém o feijão vigna responde significativamente à aplicação de H_3PO_4 (Santos, 1996).

Não está claro se o aumento na solubilidade de P sob condições sódicas reduzem a necessidade de aplicação de superfosfatos nesses solos. O fósforo encontra-se predominantemente sob a forma de fosfato de cálcio em solos sódicos. Nesse caso, sugere-se sua extração utilizando o método de Olsen (NaHCO_3 0,5 N).

O efeito do sódio trocável na adsorção/dessorção do P tem sido estudada (SHARPLEY et al., 1988). Geralmente aceita-se que o fósforo em solução aumenta quando a saturação por sódio no complexo de troca aumenta. Quando o sódio substitui o Ca, Mg e Al nos sítios de troca o potencial negativo da superfície é aumentado, conduzindo a dessorção de P.

A necessidade da aplicação prévia de gesso nos solos salino-sódicos provoca desbalanços dos teores de bases trocáveis, além de reduzir a disponibilidade de fósforo ao longo do seu manejo (Santos, 1955), como mostra os dados da Tabela 3.

Em solos salino-sódicos uma alternativa para aumentar a absorção de macronutrientes é a aplicação de uma fonte ácida de fósforo, tal como o H_3PO_4 (Santos, 1996).

9.3.2 Deficiência de nutrientes

Os solos sódicos apresentam de moderada a fraca fertilidade, com variada capacidade de fornecer nutrientes às plantas. Acentuadas deficiências de N e P são comuns e frequentemente estão associadas com a deficiência de outros nutrientes, especialmente o S e os micronutrientes Mo, Cu, Zn e Mn.

A baixa fertilidade desses solos pode está relacionada com sua idade e aos materiais de origem. A limitada lixiviação e a inundação dos solos afetados por influência da salinização e a conseqüente sodificação também causa transformações de nutrientes reduzindo a fertilidade.

A extensiva salinização em solos de regiões áridas e semi-áridas resultam em alto pH, causando deficiências de nutrientes e, em alguns casos, a toxicidade de íons.

A deficiência de micronutrientes resulta da interação das condições do solo, variação genética entre espécies, clima e desbalanços de nutrientes. As condições de sodicidade apresentadas pelos solos sódicos afetam a natureza da solução do solo e a disponibilidade de nutrientes. O baixo conteúdo de O_2 em solos sódicos inundados conduz à transformações químicas dos nutrientes, tornando-os indisponíveis às plantas ou atingindo níveis tóxicos. Na realidade há poucas informações sobre a disponibilidade de micronutrientes em solos sódicos. Trabalhos indicam apreciável liberação de Zn^{2+} de solos sódicos ($\text{pH} \geq 9,1$) apenas após o solo ser acidificado para eliminar o CaCO_3 . Sem esse tratamento, tanto o Zn^{2+} quanto o Cu^{2+} são praticamente indetectáveis no solo, apresentando concentrações na solução do solo de 10^{-3} a 10^{-6} e de 10^{-6} a 10^{-7} Mol L^{-1} , respectivamente para o Zn^{2+} e Cu^{2+} . A incorporação de matéria orgânica no solo pode mobilizar esses nutrientes e fornecer Zn e Cu para as plantas.

Quanto ao Fe^{3+} , Fe^{2+} e Mn^{2+} em solos sódicos, apresentam redução de suas atividades logaritmicamente, para cada aumento de uma unidade no pH e alcança o valor

mínimo ao redor de pH 9 (Lindsay, 1979). A “clorose de Fe induzida pelo calcário” é comum sob essas condições. Entre os fatores que restringem a disponibilidade de Fe citam-se o excesso de CaCO_3 e de HCO_3^- , excesso de água, o alto pH ($> 8,5$), a pobre drenagem e a deficiente aeração das raízes (Naidu & Rengasamy, 1993).

Tabela 9.3 Características químicas de um solo salino-sódico antes da aplicação do gesso (AAG), após a lixiviação dos sais (ALS) e após cultivo do feijão (ACF).

Parâmetros	Unidades	AAG	ALS		ACF	
			-----Gesso (g kg^{-1})-----			
			6	12	6	12
pH CaCl_2	-	8,8	7,8	7,7	7,4	7,1
CE	dS m^{-1}	2,5	2,0	2,2	2,6	3,4
Ca²⁺	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	15,3	17,9	25,0	15,4	19,3
Mg²⁺	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	3,0	1,3	1,5	3,2	2,9
K⁺	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	0,25	0,75	0,99	0,83	0,72
Na⁺	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	4,5	2,2	2,1	3,0	2,4
H⁺+Al³⁺	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	0,5	0,6	0,6	0,9	0,9
SB	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	23,0	22,3	29,6	22,4	25,3
CTC	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	23,5	22,9	30,2	23,3	26,2
S(SO₄²⁻)	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	1,6	9,3	22,0	10,9	22,3
Cl⁻	$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	8,5	2,0	1,0	2,7	3,3
V	%	98	97	98	96	96
SS	%	19	9,8	6,4	13	9
Ca/Mg	-	5,0	13	16	4,8	6,9
P	mg dm^{-3}	53	45,1	34,6	184	161
N TOTAL	mg dm^{-3}	6,8	7,2	6,5	7,3	6,2

SS = saturação por sódio

O boro e o molibdênio são mais solúveis em solos sódicos que em solos com pH neutro. Todavia, alterações no pH e a complexação por compostos orgânicos tem uma maior influência sobre a sua disponibilidade. A deficiência de Mo ou B ocorre mais facilmente sob condições de acidez que sobre sodicidade. Já a toxidez de B é bastante comum em solos sódicos, onde encontra-se frequentemente concentrações acima de 10 mg kg^{-1} . A aplicação de gesso seguido de lavagem do solo reduz os níveis de B a concentrações toleráveis.

Nos parágrafos anteriores foram discutidos os mecanismos e processos controlados pela química do solo e pelo pH. O aumento da concentração salina nos solos indica possíveis problemas de sodicidade, logo, há uma necessidade urgente de investigar a interação entre sodicidade e fertilidade nos solos agrícolas e seus efeitos na disponibilidade de nutrientes.

9.3.3 Toxicidade de íons Na^+

A acumulação de sais solúveis nos solos inibe drasticamente o crescimento das plantas. Tal ocorrência induz a plasmólise, pela qual a água move-se da planta para a solução do solo.

A presença de altas quantidades de íons de Na^+ origina condições tóxicas às plantas. A sensibilidade das plantas ao Na^+ varia entre os genótipos. Entre as espécies, a cultura do arroz tem apresentado maior tolerância a toxicidade. Além do efeito direto do Na^+ , a baixa concentração de Ca^{2+} ($< 1 \text{ mmol } \ell^{-1}$) conduz a uma alta relação Na/Ca causando desbalanços nutricionais e efeitos fisiológicos adversos nas plantas. Devido a alta absorção de Na^+ e baixa de Ca^{2+} pelas plantas, em solos sódicos, a permeabilidade da membrana é afetada, reduzindo o transporte de íons. A baixa concentração de Ca^{2+} nesses solos também conduz a um aumento na absorção e toxicidade dos elementos Zn, Ni, Mg, Pb, Se, Al e B.

A proporção relativa de Ca^{2+} na solução do solo, que é normalmente adequada para as plantas sob condições não salinas, torna-se inadequada sob condições salino-sódicas. O fato é que os baixos níveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} em solos sódicos aumenta a RAS da solução do solo conduzindo a deficiências de Ca^{2+} e/ou Mg^{2+} para as plantas. A alternativa é a aplicação de uma fonte de Ca^{2+} , como o gesso.

A disponibilidade de Ca^{2+} é um importante fator no manejo de solos sódicos e salino-sódicos. Nos primeiros a deficiência de Ca^{2+} ocorre principalmente devido a alto pH e a inadequada aeração, já no segundo deve-se a competição iônica durante o processo de absorção. A alta concentração de Na^+ também provoca deficiência de outros nutrientes, tais como o K, Zn Cu e Mn.

9.4 INFLUÊNCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA

9.4.1 Disponibilidade de nutrientes

Há uma aceitação geral que a matéria orgânica aumenta a fertilidade do solo por sua capacidade de fornecer nutrientes para as plantas, especialmente o N. Na realidade, a matéria orgânica é a maior fonte de cargas negativas, sendo responsável tanto pela retenção quanto pela liberação de nutrientes para a solução do solo, especialmente o N, P e S, através do processo de mineralização.

O acúmulo de matéria orgânica em solos sódicos é difícil porque os complexos orgânicos com Na^+ são altamente solúveis e móveis. O grau de formação de ligações covalentes do Na^+ com moléculas orgânicas é baixa devido ao seu pequeno potencial quando comparado com o de íons divalentes ou trivalentes. No entanto, devido a baixa atividade microbiana em ambientes com excesso de sódio, é comum encontrar manchas superficiais escurecidas (álcali-negro) em solos sódicos.

Muito do N e S em solos agrícolas provem da matéria orgânica. Evidentemente, para que o suprimento desses nutrientes seja contínuo é necessário que ocorra a mineralização da matéria orgânica e que esta esteja em quantidade suficiente para uma maior atividade microbiológica. A principal limitação é que em solos sódicos ou salino-sódicos, o excesso de sódio ou o estresse osmótico reduz a população microbiana. Sabe-se que a nitrificação é completamente inibida a $\text{PST} > 7,0$, portanto a manutenção de baixas concentrações de Na^+ no solo é indispensável para que ocorra uma maior disponibilidade de N. Em geral, a capacidade dos cátions de estimular a mineralização do

N orgânico diminui juntamente com o seu potencial iônico ($Al^{3+} > Fe^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$). Assim, como ocorre em solos sódicos, quando o valor da RAS é aumentado, a contribuição de nutrientes via matéria orgânica é diminuída.

Trabalhos em solo salino-sódico tem indicado, entre outros, um acentuado aumento nos teores de fósforo extraído em resina quando se aplicou material vegetal proveniente de mucuna-preta (Tabela 9.4).

Tabela 9.4 Efeito de resíduos orgânicos nos teores de nutrientes nas diferentes doses de gesso aplicadas em solo salino-sódico.

Gesso	Mat. org.	Ca	Mg	K	P	Fe	Cu	Zn	Mn
Mg ha ⁻¹	g vaso ⁻¹	-----	Cmol _c dm ⁻³ -----	-----	-----	-----	μg cm ⁻³ -----	-----	-----
0	0	12,6a	2,8a	0,31 ^a	17,0 ^a	168a	2,6a	4,1a	115a
	35	12,8a	2,8a	0,35b	26,3b	170b	2,7a	3,7a	118a
7	0	14,3a	2,5a	0,26 ^a	16,1 ^a	167a	2,5a	3,2a	114a
	35	14,2a	2,5a	0,27 ^a	25,3b	163a	3,0a	3,8b	116a
14	0	15,1a	2,1a	0,24 ^a	16,1 ^a	186a	3,6a	3,7a	118a
	35	16,0b	2,0a	0,32b	25,7b	205b	5,7b	3,7a	126b
21	0	17,1a	1,9a	0,23 ^a	13,9 ^a	167a	6,2a	4,2a	110a
	35	17,8a	1,6b	0,29b	25,0b	168a	6,3a	4,1a	116a

Na vertical, números seguidos por letras distintas diferem a 5% de probabilidade pelo teste de tukey.

9.4.2 Efeitos da sodicidade

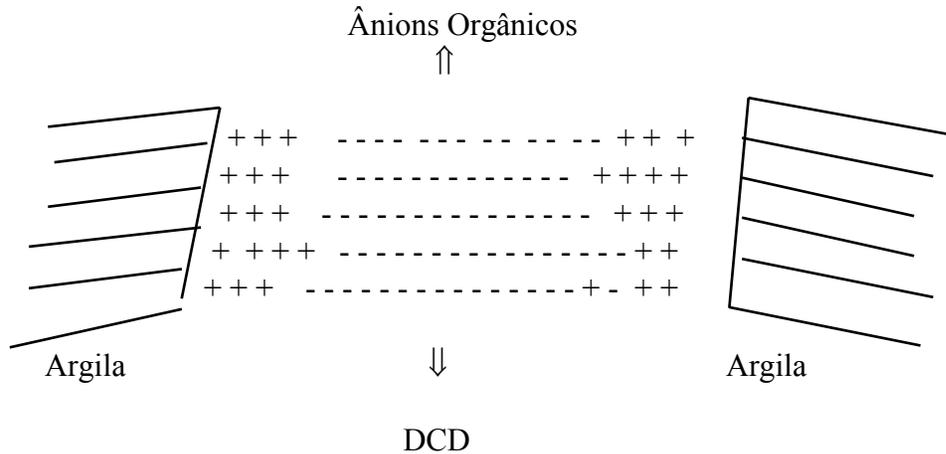
A matéria orgânica é conhecida como promotora da macroagregação do solo, melhorando suas propriedades físicas. Mas, os agentes cimentantes da matéria orgânica são representados pelos polissacarídeos, que correspondem a apenas ¼ da matéria orgânica. De fato, o material orgânico pode provocar tanto expansão quanto a dispersão quando aplicado nos solos, especialmente em solos salino-sódicos ou sódicos que já apresentam um alto potencial dispersivo.

A literatura é conflitante quando trata dos efeitos da matéria orgânica na dispersão de solos sódicos. A dispersão tem sido inversamente correlacionada com os conteúdos de matéria orgânica em solos sódicos com baixos valores de PST (Loveday et al., 1987). Todavia, a adição de matéria orgânica aumenta a dispersão de argila a altos valores de RAS (Gupta et al., 1984), indicando que sua remoção pode reduzir a dispersão em solos saturados por sódio. Oades (1984) estudando os mecanismos e as implicações da matéria orgânica no manejo do solo concluiu que a dispersão das partículas de argila nos microagregados é promovida por sua complexação com ácidos orgânicos, os quais aumentam as cargas negativas na superfície das argilas.

Acredita-se que a matéria orgânica pode dispersar partículas do solo, principalmente quando presente em pequenas quantidades, pelo fato de incluir alta concentração de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, e pelas cargas negativas do complexo argila-óxido metálico-matéria orgânica estarem a maior distância da partícula devido a presença de Na^+ no sítio de troca.

O efeito dispersivo da matéria orgânica pode ser explicado pelo efeito da alta concentração de ácidos orgânicos (fúlvicos, húmicos, oxálicos, cítricos, tartárico) nas partículas do solo. Os passos abaixo explicam o processo:

a) O alto percentual de ácidos orgânicos eleva a concentração de cargas negativas na dupla camada difusa (DCD), aumentando a distância entre as partículas sólidas,



b) Os ânions orgânicos podem ainda complexar o Fe^{3+} e Al^{3+} que tem poder de agregante, contribuindo para a menor agregação do solo, deixando a argila contida nos agregados mais propensa a sofrer a dispersão.

O efeito isolado do Na trocável em promover dispersão da matéria orgânica pode ser explicado, pelo menos em parte, pela ineficiência do sódio como cátion ligante, quando comparado com cátions polivalentes como o Ca^{2+} , Al^{3+} e Fe^{3+} . O cátion ligante, o qual une as argilas com cargas negativas permanentes a grupos funcionais da matéria orgânica, ou os ânions orgânicos à cargas variáveis das argilas quando essas são positivamente carregadas sob condições ácidas. Sem esses a agregação nos solos é reduzida.

9.5 MANEJO DA FERTILIDADE EM SOLOS SALINOS E SÓDICOS

Os efeitos interativos da fertilidade-salinidade-sodicidade tem sido estudados apenas superficialmente. Os resultados tem sido contraditórios, dependendo da condição particular de cada estudo. Os efeitos osmóticos da alta concentração de sais são os mais prejudiciais em solos salino-sódicos (Figura 9.6). Em solos sódicos, a degradação estrutural é o fator primário que afeta diretamente as propriedades físicas do solo e, portanto, a disponibilidade de nutrientes.

Em solos salino-sódicos, quando a concentração de Na aumenta, a necessidade de nutrientes para as plantas, tanto no substrato quanto nos tecidos vegetais, também aumenta. Caso a cultura não seja sensível aos sais e o nível de salinidade não seja alto, o estresse osmótico pode ser compensado pela aplicação de fertilizantes. A produção

vegetal aumenta devido a aplicação de fertilizantes até um certo nível de CE na solução do solo (Figura 9.7).

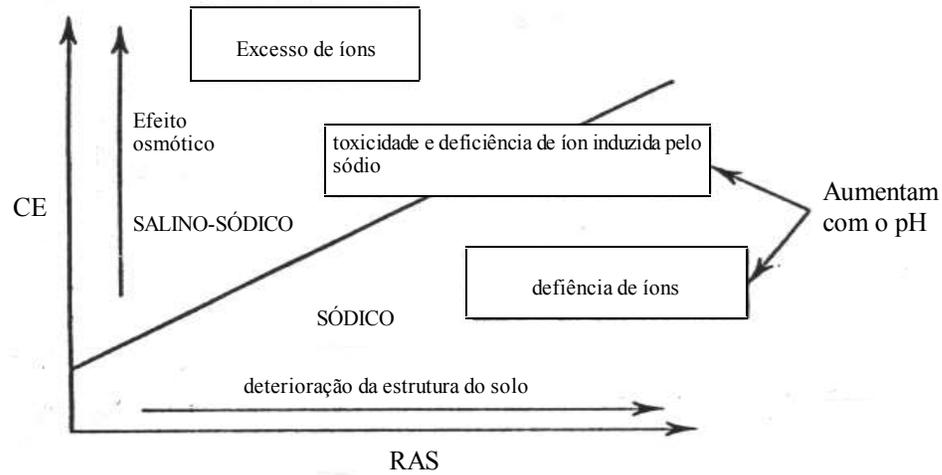


Figura 9.6 Mecanismos que explicam o efeito prejudicial da CE e da RAS na disponibilidade de nutrientes.

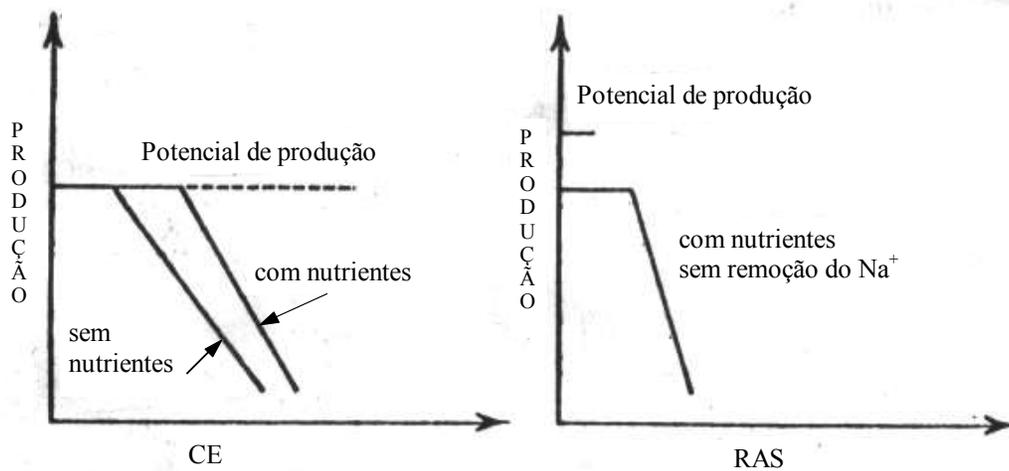


Figura 9.7 A produção relacionada a condições salinas e sódicas.

Por outro lado, a indisponibilidade de nutrientes em solos sódicos são causados indiretamente por efeitos físicos prejudiciais, tais como o reduzido transporte de água e nutrientes. No entanto é importante ter em mente que, para a aplicação de fertilizantes proporcionar aumentos à produção das culturas é necessário que a correção das

propriedades físicas, para solos sódicos, e a lixiviação do excesso de sais, para os solos salinos, sejam efetuadas.

A deficiência de nutrientes e a toxicidade de íons ocorre tanto em solos salinos quanto em sódicos. Todavia, os mecanismos do efeito prejudicial no crescimento das plantas em solos sódicos difere dos solos salinos. A fertilidade dos solos sódicos depende (1) da presença de água, oxigênio e nutrientes na forma iônica; (2) da capacidade do solo em liberar oxigênio e nutrientes por fluxo de massa e difusão para a superfície das raízes; (3) da presença de uma composição iônica favorável e (4) da ausência de substâncias que reduzam o movimento de nutrientes para as raízes. O fornecimento de água, oxigênio e nutrientes para as raízes em solos sódicos é restringida pela deterioração da estrutura do solo causada pela sodicidade. A maior concentração de Na^+ que de Ca^{2+} nesses solos é a maior causa dos problemas físicos e de disponibilidade de nutrientes. Portanto, a correção da sodicidade é o primeiro passo a ser considerado quando se tenta aumentar a produtividade dos solos sódicos. A redução do pH superior a 9,0 para valores menores que 8,0 seria um dos maiores passos para melhorar a correção de solos sódicos. A liberação de H^+ no sistema através da mineralização da matéria orgânica e reações de transformações do N pode melhorar o pH.

9.5.1 Manejo do nitrogênio, fósforo e potássio

Nitrogênio

Devido a baixa fertilidade dos solos sódicos a salino-sódicos, as culturas tem o suprimento de N deficiente e este deve ser suplementado através de fertilizantes. A uréia é um dos fertilizantes mais frequentemente usados. Quando a uréia é hidrolizada a amônia e CO_2 pela enzima urease, ocorre perdas de N através da volatilização da amônia, e tal processo é mais intenso em solos com pH elevado, característica típica de solos sódicos ou salino-sódicos. Devido o aumento do pH provocar maior volatilização da NH_3 da uréia ou de outras fontes (Fenn & Kissel, 1973), deve-se procurar alternativas que minimizem essas perdas. A aplicação de fontes ácidas, como o H_2SO_4 ou de reação ácida como a pirita (FeS_2), a incorporação do fertilizante a maiores profundidades ou seu parcelamento em 3 ou 4 vezes são práticas recomendáveis.

Por influirem na reação do solo e, portanto, em sua fertilidade, deve-se aplicar outras fontes nitrogenadas. Por exemplo, a solução saturada que se produz na “Zona do fertilizante” é alcalina quando se aplica fosfato diamônico (pH = 7,98; $3,82 \text{ Mol } \ell^{-1} \text{ P}$) e é ácida para o monoamônico (pH = 3,47; $2,87 \text{ Mol } \ell^{-1} \text{ P}$); assim, é favorável o uso desta fonte em solos sob condições alcalinas. Os produtos resultantes da reação de fertilizantes em solos sódicos calcários pode ser um parâmetro para se escolher a fonte a ser usada, segundo mostram as reações do sulfato de amônio, fosfato diamônico (Figura 9.8) e nitrato de amônio (Figura 9.9).

cessando a liberação de NH_4^+ para a solução do solo quando esta atinge alta concentração.

As perdas de nitrogênio, em forma NH_3 , após a aplicação de fontes nitrogenadas em solos com excesso de sódio variam grandemente entre os solos : 87% a pH 10,5 (Jewitt, 1942), ou de 30 a 65% (Rao & Batra, 1983).

As taxas de volatilização e as perdas de N podem ser substancialmente reduzidas ($\cong 90\%$) se o fertilizante for aplicado na profundidade de 6 a 7 cm do solo, e em torno de 10 cm para a cultura do arroz. A incorporação de resíduos orgânicos pode também compensar as possíveis perdas do nitrogênio.

A dose de N recomendada para solos com pH alto é em torno de 120 kg ha^{-1} de N.

Fósforo e potássio

Apesar de existir, segundo a literatura, uma maior concentração de fósforo disponível com o aumento da sodicidade e dos níveis de CaCO_3 nos solos, Chhabra et al. (1981) relatam que o fósforo extraído pelo método de Olsen reduziu-se à medida que a dose de gesso aplicada no solo foi aumentada. A aplicação de gesso em solos salino-sódicos de origem aluvial tem provocado redução nos teores de fósforo disponível (Santos, 1995). Isso apesar desses solos apresentarem teores totais de P elevados (547 mg cm^{-3})

A indisponibilidade de fósforo em solos sódicos corrigidos com gesso pode estar associada a formação de fosfatos de cálcio insolúveis, que precipitam na solução do solo com altos valores de pH, o que é comum em solos com excesso de sódio. A necessidade de aplicar-se corretivo em tais solos exige a adoção de práticas que reduzam a precipitação do fósforo nos solos sódicos ou salino-sódicos. A aplicação de ácidos tem aumentado a disponibilidade de fósforo em solo salino-sódico (Tabela 9.5).

Tabela 9.5 Efeito das doses de fósforo na quantidade de nutrientes absorvidos pelo feijoeiro vigna cultivado em solo salino-sódico.

Nutrientes	Fósforo (mg kg^{-1})	
	00	200
	----- mg vaso ⁻¹ -----	
N	64,37a	181,93b
P	5,01a	31,28b
K	82,86a	144,98b
Ca	67,52a	222,46b
Mg	10,42a	34,80b
S	7,48a	24,44b

Na horizontal números seguidos por letras distintas diferem a 5% pelo teste de Tukey.

A disponibilidade de potássio em solos salino-sódicos ou sódicos é adequada. A predominância de micas em solos de regiões áridas e semi-áridas, as trocas Na-K na biotita, e a dissolução das unidades estruturais das muscovitas liberam grande quantidade de potássio sob condições com excesso de sódio.

9.6 CONCLUSÕES

A maioria dos solos aráveis das regiões áridas ou semi-áridas apresenta problemas de salinidade e/ou sodicidade. Essas condições influenciam direta ou indiretamente as propriedades físicas, físico-químicas e químicas do solo e a sua fertilidade. A manutenção da concentração de íons sódio em níveis baixos reduzem a dispersão das argilas, o encrostamento, a densidade e as perdas por erosão do solo, aumentando a floculação e a estabilidade dos agregados do solo. A redução da condutividade elétrica e do pH do solo salino-sódico provocam, respectivamente, diminuição no potencial osmótico da solução e aumento na disponibilidade de nutrientes no solo.

A elevada heterogeneidade dos solos sob condições salinas exigem o conhecimento sobre a dinâmica da química da solução desses solos, já que seus problemas de deficiências e toxicidade de íons estão associados à reação do solo, especialmente ao pH, em solos sódicos, e do potencial osmótico, em solos salinos. Especificamente, para os solos sódicos os altos níveis de sódio comparado com os de cálcio, o alto pH, a baixa atividade biológica e o baixo potencial de oxi-redução, são os problemas mais graves, pois resultam em uma redução na taxa de mineralização da matéria orgânica e na disponibilidade de N, P, S, Mn, B, Zn, Cu, Fe. A toxicidade do boro é comum em solos sódicos.

A aplicação prévia de corretivos, a lavagem e a adição de fertilizantes e de matéria orgânica eliminam significativamente os aspectos negativos desses solos, melhoram sua fertilidade e a produtividade agrícola. Deve-se optar por fertilizantes de reação ácida ou que não originem produtos que precipitem. A fonte nitrogenada a ser incorporada deve apresentar uma volatilização mínima de NH_3 . A aplicação de fósforo após a correção com gesso é imprescindível. Evidentemente, devido a complexidade desses solos e aos conflitantes resultados que constam na literatura, é necessário a realização de futuras pesquisas para identificar práticas de manejo que proporcionem melhoria na fertilidade e nas características físicas dos solos afetados por sais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABROL, I. P., CHHABRA, R., GUPTA, R. K. **A fresh look at the diagnostic criteria for sodic soils.** In: Proc. Int. Symp. Salt-affected soils, Karnal, 1980. p. 142-147.
- BERNSTEIN, L. Effects of salinity and sodicity on plant growth. **Annual Review of Plant Phytopathology**, Stanford, v. 13, p. 295-312, 1975.
- BOHN, H. L.; McNEAL, B. L., O'CONNOR, G.A. **Soil chemistry.** Second Edition, John Wiley & Sons, York, 1985. 341 p.
- CHANG, C. W., DREGNE, H. E. Effect of exchangeable sodium on soil properties on growth and cations content of alfafa and cotton. **Soil Sci Soc. Am. J.**, Madison, v. 19, p. 29-35, 1955.
- CHHABRA, R., ABROL, I. P., SINGH, M. V. Dynamics of phosphorus during reclamation of sodic soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 132, n. 5, p. 319-324, 1981.

- FENN, L. B., KISSEL, D. E. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils. I. General theory. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, v. 37, p. 855-859, 1973.
- GUPTA, R. K., BHUMBLA, D. K., ABROL, I. P. Effect of sodicity, pH, organic matter, and calcium carbonate on the dispersion behaviour of soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 137, n. 4, p. 245-251, 1984.
- GUPTA, R.K., ABROL, I.P. Sal-affected soils: their reclamations and management for crop production. **Adv. Soil Sci**, New York, v. 11, p. 224-88, 1990.
- GUPTA, R.K., CHHABRA, R., ABROL, J. P. Relationship between pH and exchangeable sodium in a sodic. **Soil Science**, Baltimore, v. 139, p. 312-219, 1981.
- JEWITT, T. N. Loss of ammonia from ammonium sulphate applied to alkaline soils, **Soil Science**, Baltimore, v. 54, p. 401-409, 1942.
- KOVDA, V. A. Alkaline soda-saline soils. **Agrokem. Talajt**, v. 14, p. 15-48, 1965.
- LINDSAY, W. **Chemical Equilibria in Soils**. John Wiley, New York, 1979. 449 p.
- NAIDU, R., RENGASAMY, P. Ion interactions and constraints to plant nutrition in Australian sodic soils. **Aust. J. Soil. Res.**, Victoria, v. 31, p. 801-19, 1993.
- NITANT, H. C., BHUMBLA, D. R. Urea transformations in salt affected and normal soils. **J. Indian Soc. Soil Sci**, v. 22, p. 234-9, 1974.
- OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability : mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, The Hague, v.76, p.319-337, 1984.
- QUIRK, J. B., SCHOFIELD, R. K. The effect of electrolyte concentrations on soil permeability. **Journal of Soil Sci**, Oxford, v. 6, p. 163-178, 1955.
- RAO, D. L. N., BATRA, L. Ammonia volatilizations from applied nitrogen in alkali soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 70, p. 219-228, 1983.
- RENGASAMY, P., OLSSON, K. A. Sodicity and soil structure. **Austr. J. Soil. Res.**, v. 29, p. 935-52, 1991.
- SANTOS, R. V. dos. **Correção de um solo salino-sódico e absorção de nutrientes pelo feijoeiro vigna (*Vigna unguiculata (L.) WALP*)**. Piracicaba, 1995. 120 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade de São Paulo.
- SANTOS, R. V. dos. **Correção de um solo salino-sódico: Absorção de macronutrientes pelo feijoeiro**. XXII RBFSNP, Manaus, 1996 (Resumo)
- SHARPLEY, A. N., CURTIN, D., SYERS, J. K. Changes in water-extractability of soil inorganic phosphate induced by sodium saturated benchmark soils. **Soil Sci. Soc. Aus. J.**, p. 637-40, 1988.
- SO, H. B., AYLMOORE, A. G. How do sodic soils behave? The effects of sodicity on soil physical behaviour. **Aust. J. Soil Res.**, v. 31, p. 761-77, 1993.
- TAN, K. H. **Principles of Soil Chemistry**. Marcel Dekker INC, New York, 1982. 267 p.