

MONALIZA ALVES DOS SANTOS

**RECUPERAÇÃO DE SOLO SALINO-SÓDICO POR FITORREMEDIAÇÃO
COM *Atriplex nummularia* OU APLICAÇÃO DE GESSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do solo.

RECIFE
PERNAMBUCO - BRASIL
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO – UFRPE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
DEPARTAMENTO DE AGRONOMIA

MONALIZA ALVES DOS SANTOS

**RECUPERAÇÃO DE SOLO SALINO-SÓDICO POR FITORREMEDIAÇÃO
COM *Atriplex nummularia* OU APLICAÇÃO DE GESSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do solo.

Orientadora

Prof^a. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, Dr^a.

Co – Orientadores

Prof. Brivaldo Gomes de Almeida, Dr.

Prof. Alexandre Tavares da Rocha, Dr.

RECIFE
PERNAMBUCO - BRASIL
2012

Ficha catalográfica

S237r Santos, Monaliza Alves dos
Recuperação de solo salino-sódico por fitorremediação
com *Atriplex nummularia* ou aplicação de gesso / Monaliza
Alves dos Santos. -- Recife, 2012.
89 f. : il.

Orientador (a): Maria Betânia Galvão dos Santos Freire.
Dissertação (Mestrado em Ciências do solo) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento
de Agronomia, Recife, 2012.

Referências.

1. Química do solo 2. Fertilidade do solo 4. Microbiologia
do Solo 5. Solos afetados por sais 6. Fitoextração 7. Erva-sal
8. Corretivo químico 9. Solos salinos – manejo I. Freire, Maria
Betânia Galvão dos Santos, orientadora II. Título

CDD 631.4

MONALIZA ALVES DOS SANTOS

**RECUPERAÇÃO DE SOLO SALINO-SÓDICO POR FITORREMEDIAÇÃO
COM *Atriplex nummularia* OU APLICAÇÃO DE GESSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do solo.

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora em 02 de março de 2012

Orientadora:

Maria Betânia Galvão dos Santos Freire

Examinadores:

Dr. André Júlio do Amaral

Dr. Alexandre Tavares da Rocha

Dr. Edivan Rodrigues de Souza

*Algo só é impossível até que alguém
duvide e acabe provando o contrário.*

(Albert Einstein)

*O conhecimento torna a alma jovem. Colhe,
pois, a sabedoria. Armazena suavidade para
o amanhã.*

(Leonardo da Vinci)

Aos meus pais, cujo amor, carinho, dedicação e fé em mim me ensinaram a ter fé em mim mesma e em Deus.

DEDICO E OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

No agradecimento não cabe a ingratidão, se assim for, então esse se tornará o paradoxo de si mesmo. Por isso, sem muitas menções, agradeço de forma especial a todos que de diferentes formas contribuíram para essa conquista.

Agradeço a Deus, pela sua presença em todos os momentos da minha vida.

A minha família, pelo amor a mim dedicado.

A professora Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, pelo carinho, estímulo e apoio na sua orientação.

Ao professor Brivaldo Gomes de Almeida, pela sua colaboração prestada neste trabalho.

Agradeço imensamente os gestos de carinho, atenção e delicadeza.

Agradeço, sem esquecer das lições dos meus mestres, dos benquistos momentos de descontração, amizade e incentivo dos meus amigos, dos préstimos dos meus companheiros e dos favores daqueles que me cercam. E até àqueles que não vi, não ouvi e não discerni.

A conjugação de todas as suas bem-vindas ações. Muito obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DE LITERATURA	02
2.1. SOLOS AFETADOS POR SAIS	02
2.2. EFEITO DOS SAIS NO SOLO	04
2.3. EFEITO DA SALINIDADE NAS PLANTAS	05
2.4. MECANISMOS DE TOLERÂNCIA À SALINIDADE	07
2.5. <i>Atriplex nummularia</i> Lindl	10
2.6. TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO DE SOLOS AFETADOS POR SAIS	12
2.6.1. TÉCNICAS CONVENCIONAIS	12
2.6.2. FITORREMEDIAÇÃO	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	19
3.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	19
3.3. TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	20
3.4. MONTAGEM E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO	21
3.5. COLETA E AVALIAÇÃO DAS PLANTAS	23
3.6. COLETA E ANÁLISES DE SOLO	23
3.7. ANÁLISES ESTATÍSTICAS	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1. CRESCIMENTO DA PLANTA	26
4.2. PRODUÇÃO DE BIOMASSA	32
4.3. COMPOSIÇÃO MINERAL E EXTRAÇÃO DE SAIS	35
4.4. ALTERAÇÃO DA SALINIDADE DO SOLO	43
4.5. DINÂMICA DOS ÍONS NO SOLO	49
4.6. ALTERAÇÃO DA SODICIDADE DO SOLO	59
4.7. PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO	64
5. CONCLUSÕES	74
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	89

RECUPERAÇÃO DE SOLO SALINO-SÓDICO POR FITORREMEDIAÇÃO COM *Atriplex nummularia* OU APLICAÇÃO DE GESSO

RESUMO

Ambientes sob clima árido e semiárido podem apresentar solos com elevados teores de sais, que dificultam o desenvolvimento de plantas, sendo retirados do processo produtivo e se constituindo núcleos de degradação. Nestas condições, plantas glicófitas não conseguem vegetar pelos elevados teores de sais, que dificultam seu metabolismo, entretanto, para as plantas halófitas este é um ambiente propício, podendo representar um agente recuperador do solo, com a extração de sais na matéria vegetal produzida, pela técnica da fitorremediação. O trabalho foi desenvolvido em um CAMBISSOLO salino sódico do Perímetro Irrigado Cachoeira II, Serra Talhada (PE), com o objetivo de avaliar as alterações nas propriedades físicas e químicas do solo quando submetido ao cultivo com a halófito *Atriplex nummularia* Lindl, em comparação com a correção química com gesso; e o monitoramento do crescimento e produção da planta sob dois espaçamentos em manejo de poda a cada seis meses. Realizaram-se amostragens semestrais, com quatro coletas de solo (0, 6, 12 e 18 meses) e três cortes na planta a 50 cm da superfície do solo (6, 12 e 18 meses), mensurando-se o material produzido a cada poda. O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso, onde foram avaliados quatro tratamentos: o controle (sem nenhum manejo do solo), o de correção química com gesso (sem cultivo) e dois com cultivo de *Atriplex nummularia* Lindl, (espaçamentos 1 x 1 m e 2 x 2 m), com quatro repetições. Os resultados das análises químicas e físicas do solo revelaram a contribuição da aplicação de gesso e especialmente do cultivo de plantas de atriplex na redução dos problemas de salinidade-sodicidade e na melhoria nas propriedades físicas do solo. As análises biométricas e do tecido vegetal das plantas, evidenciaram o potencial fitorremediador da *Atriplex nummularia* Lindl, com destaque para as plantas no espaçamento 1 x 1 m, que se apresentou como a melhor recomendação de cultivo com podas frequentes, em função do maior rendimento na produção da matéria vegetal e da extração de sais por área plantada.

Palavras-chave: solos afetados por sais, fitoextração, erva-sal, corretivo químico, manejo de solos salinos.

RECLAMATION OF SALINE-SODIC SOIL BY PHYTOREMEDIATION WITH *Atriplex nummularia* OR APPLICATION GYPSUM

ABSTRACT

Arid and semi-arid environments may present salty soils, which hamper plant growth, being removed from productive process constituting degradation cores. Under these conditions, glycophyte plants can't growth because high levels of salts hinder their metabolism, however, for halophytes this is favorable environment and these plants may represent a key to soil reclamation, extracting salts in the vegetable material produced by phytoremediation technique. The study was conducted in a saline sodic INCEPTISOL from the Cachoeira II Irrigation Perimeter, Serra Talhada (PE), with the objective of evaluating changes in soil physical and chemical properties when under cultivation with the halophyte *Atriplex nummularia* Lindl, compared with chemical correction with gypsum, and plant growth and production monitoring under two spacing in the pruning management every six months. Samples were taken every six months, with four soil samples (0, 6, 12 and 18 months) and three cuts in the plant 50 cm from the ground surface (6, 12 and 18 months) measuring the material produced at each pruning. The experimental design was randomized blocks, four treatments were evaluated: control (no soil management), chemical correction with gypsum (no crop) and two *Atriplex nummularia* cultivation, one at 1 x 1 m spacing and other at 2 x 2 m spacing, with four replications. The results of soil chemical and physical analysis revealed the contribution of gypsum application and especially the cultivation of atriplex plants in reducing the problems of salinity-sodicity and improving soil physical properties. The biometric analysis and plant tissue showed the *Atriplex nummularia* potential for phytoremediation, with emphasis on the 1 x 1 m spacing which presented as the best recommendation of cultivation with frequent pruning due to higher plant material yield and extraction of salt per planted area.

Key works: salt affected soils, phytoextraction, saltbush, chemical correction, management of saline soils.

1. INTRODUÇÃO

O solo, pela sua importância em diversos mecanismos bióticos e abióticos, se traduz na representação da vida. É um recurso interativo e mantém relações sinérgicas com processos fundamentais para manutenção da evolução humana na Terra.

A preservação da qualidade do solo é considerada capital, pois está diretamente relacionada a diferentes segmentos de vital importância no sentido agrícola, ambiental, econômico e social.

A importância da preservação dos ecossistemas, ou da biodiversidade, justifica a existência de uma gestão eficiente dos recursos naturais, primando pela sua sustentabilidade, e o uso dos diversos ecossistemas de maneira sustentável gera vantagens econômicas que podem proporcionar ganhos a toda uma nação.

No entanto, no cenário atual, o crescimento populacional pressiona o emprego de medidas que se adequem e acompanhem esse elevado contingente de pessoas. Assim, estabelece-se uma dicotomia entre a necessidade de desenvolvimento e as suas implicações negativas sobre os sistemas naturais.

A aplicação de modelos agrícolas sem planejamento e gerenciamento adequados, em regiões áridas e semiáridas, tem promovido significativas perdas de qualidade ambiental, com conseguinte diminuição do potencial produtivo dos solos e do desenvolvimento regional. A prática da agricultura irrigada está inserida neste contexto, uma vez que, ao mesmo tempo em que promove uma série de benefícios nos aspectos socioeconômicos de uma região, sua inadequada aplicação também pode gerar interferências negativas ao meio ambiente, estabelecendo um efeito antagônico ao seu objetivo original.

A salinização é uma das consequências da ausência de um manejo correto da irrigação e de um sistema de drenagem funcional. Esse processo traz consigo significativas e complexas alterações nas regiões agrícolas, sobretudo em perímetros irrigados do semiárido Nordeste. Segundo Freire & Freire (2007), as áreas salinas e sódicas só deixarão de se expandir no Brasil quando houver maior preocupação com os efeitos da irrigação sobre a capacidade produtiva dos solos, com a adoção de práticas de manejo adequadas para evitar a salinização de locais ainda não afetados pelo problema e, também, com a melhoria das condições dos solos já afetados.

O uso dos solos degradados pela salinização na agricultura não pode ser negligenciado, sendo necessário desenvolver técnicas ambiental e economicamente

viáveis para a remediação dos mesmos, possibilitando seu retorno ao uso agrícola produtivo (Qadir et al., 2007; Bennett et al., 2009).

Diante da necessidade de produção agrícola e dos altos investimentos exigidos pelo processo convencional de recuperação, a fitorremediação surge como uma alternativa de baixo custo para recuperação de solos salinos, não agressiva ao ambiente, podendo propiciar a reabilitação de tais solos (Leal et al., 2008).

Portanto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar as alterações nas propriedades físicas e químicas de um solo salino-sódico quando submetido ao cultivo com a halófito *Atriplex nummularia* em comparação com a correção química com gesso, bem como elucidar questionamentos acerca do manejo da cultura da atriplex, em relação ao espaçamento, sistemas de corte periódicos e evolução do crescimento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. SOLOS AFETADOS POR SAIS

A exploração dos recursos naturais é recorrente e está num elevado grau de crescimento, constituindo-se em um dos fatores negativos fomentadores da depleção da diversidade biológica. Entre os muitos processos responsáveis pelo desequilíbrio do meio ambiente, aqueles que contaminam o solo figuram como os principais. Existe uma variedade de agentes de contaminação e, entre esses, estão os sais, os quais ocorrem em excesso predominantemente nas regiões áridas e semiáridas.

As zonas de clima árido e semiárido, onde está inserida a região de escassez de água do Nordeste brasileiro, que ocupa uma extensão de 150 milhões de hectares, possuem condições favoráveis à ocorrência de solos afetados por excesso de sais, em virtude das características de clima, relevo, geologia e drenagem, entre outros fatores. Nessa parte do Nordeste, a maioria dos perímetros de irrigação apresenta reflexos da degradação, que vão desde a diminuição nos rendimentos das culturas até o abandono das áreas exploradas (Mota & Oliveira, 1999; Barros et al., 2004; Ribeiro et al., 2010).

De modo geral, quando a concentração de sais solúveis e, ou, a predominância do íon sódio (Na^+) na fase solúvel e sobre o complexo de troca catiônico é suficientemente alta para interferir no desenvolvimento vegetal, têm-se os

atributos para a classificação de solos afetados por sais. Os sais solúveis predominantes nos solos salinos são cloretos, sulfatos e bicarbonatos de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} (Qadir et al., 2007; Holanda et al., 2010).

Três processos principais e sequenciais regem o desenvolvimento desses solos: a salinização que dá origem aos solos salinos, a solonização que promove a formação de solos sódicos e é constituído por dois subprocessos. O primeiro, a sodificação, é o processo de passagem do íon Na^+ da solução do solo para o complexo de troca, formando os solos denominados salino-sódicos. E o segundo, a dessalinização, que promove a lavagem dos sais solúveis, resultando na formação de solos unicamente sódicos. Por último, há possibilidade da evolução de um processo de degradação, denominado solodização, que leva à lavagem do Na^+ e sua substituição pelo H^+ , dando origem a solos não-salinos e não-sódicos (Ribeiro et al., 2009).

Para a classificação dos solos afetados por sais, algumas propriedades químicas do solo são empregadas: pH, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) e percentagem de sódio trocável (PST) (Ribeiro et al., 2003). A distinção entre solos halomórficos e não halomórficos é estabelecida, de acordo com United States Salinity LABILITY LABORATORY – USSS STAFF (1954), por valores específicos para as propriedades que os qualificam:

- Os solos salinos apresentam CEes maior que 4 dS m^{-1} , pH inferior a 8,5 e PST não superior a 15%;
- Solos salino-sódicos têm CEes maior que 4 dS m^{-1} , pH inferior a 8,5 e PST superior a 15%;
- Solos sódicos com CEes menor que 4 dS m^{-1} , pH variando entre 8,5 e 10 e PST superior ou igual a 15%.

O processo de salinização desenvolve-se de forma natural ou induzida. O processo natural dos solos é função de vários fatores, como: o mineralógico, pelo intemperismo químico de rochas ricas em sais; os depósitos de sais fossilizados e o clima de reduzidas taxas de precipitação e elevada evapotranspiração, gerando déficit hídrico que concentra solutos no solo; e o relevo, em que áreas planas e de cotas topográficas baixas caracterizam-se como os locais de concentração dos sais presentes no solo (Freire & Rodrigues, 2009; Leite et al., 2010).

A salinização secundária e sodicidade são estimuladas por atividades antropogênicas, envolvendo o manejo inadequado do solo e da água (Qadir et al., 2007). Dentre as práticas de manejo dos solos que causam o aumento do teor de

sais e sódio destacam-se os métodos de irrigação adotados e seu manejo, a qualidade da água utilizada na irrigação e o índice de salinidade dos fertilizantes (Leite et al., 2010).

A prática da irrigação está associada à degradação dos solos por sais. Quando a água de irrigação contém uma alta concentração de solutos, em associação à drenagem deficiente, pode-se rapidamente alcançar níveis prejudiciais ao desenvolvimento das espécies sensíveis ao sal (Epstein & Bloom, 2006; Taiz & Zeiger, 2006; Barros et al., 2009). À medida que os teores de sais no solo se elevam, outras espécies também passam a ter sua produtividade reduzida, chegando ao ponto de não compensar economicamente seu cultivo, gerando o abandono de áreas anteriormente produtivas.

A ampliação de ocorrência dos solos afetados por sais gera preocupação social em todo mundo e dados demonstram que, de aproximadamente 23 milhões de hectares irrigados no mundo, um terço dessa área já se encontra salinizado. O semiárido do Nordeste brasileiro situa-se nessa faixa de influência, onde aproximadamente 25% das áreas irrigadas na região encontram-se degradadas pela presença de sais em excesso (Gheyi, 2000; Barros et al., 2005; Epstein & Bloom, 2006; Silva et al., 2008). Diante desses problemas, fica clara a necessidade de um manejo equilibrado do sistema solo-água-planta, com o objetivo de assegurar o retorno à ocupação racional das terras e melhoria da produção das culturas.

2.2. EFEITO DOS SAIS NO SOLO

As altas concentrações de sais e de sódio no sistema solo geram efeitos adversos e preocupantes sobre o próprio solo e sobre as plantas, tendo como consequência a perda da capacidade produtiva dos solos e enormes prejuízos socioeconômicos, causa principal dos transtornos nos perímetros irrigados (Barros et al., 2009).

Como na condição de degradação ocorre elevação na concentração de sais da solução do solo, que é determinada conforme a intensidade do processo de salinização e das condições a que o solo está submetido, esta condição promove alterações nos processos físicos e químicos do solo. Isso reflete, especialmente, no equilíbrio entre a dispersão e a floculação de coloides, que interfere na estruturação das partículas constituintes, distribuição de poros, condutividade hidráulica e na movimentação de partículas ao longo do perfil do solo (Freire & Freire, 2007).

O processo de degradação agrava-se quando há o predomínio do íon sódio em relação aos sais de cálcio e magnésio, tornando o manejo do solo mais problemático, pois ocorrem alterações nas suas propriedades físicas. Nesses solos, caracterizados como sódicos e salino-sódicos, o sódio passa a representar altas proporções no complexo de troca. Isso estabelece no solo uma condição de dispersão, em que os colóides dispersos são movimentados no perfil, obstruindo poros em horizontes subsuperficiais e, assim, alterando a estrutura do solo (Ruiz et al., 2004; Qadir et al., 2007; Dias & Blanco, 2010).

Com a desestruturação do solo, pode haver aumento da densidade do solo e de sua retenção de água, devido à redução do espaço poroso. Toda influência sofrida pela porosidade do solo é refletida nos seus parâmetros físico-hídricos, de modo que há a diminuição da condutividade hidráulica e da infiltração de água no solo (Dias & Blanco, 2010; Ferreira et al., 2010).

A contribuição do sódio trocável no processo de dispersão de solos vai ser regida pelo tipo de mineral de argila dominante. Caulinitas e ilitas apresentam pouca expansão, enquanto que esmectitas e, em menor extensão, vermiculitas são altamente expansíveis. A dispersão desses minerais verifica-se em resposta a forças repulsivas que são, geralmente, atribuídas a expansão das duplas camadas difusas em associação com a presença do sódio adsorvido (Freire et al., 2003).

O processo de degradação é desencadeado, inicialmente, por esta dispersão, e pode evoluir até a formação de horizontes adensados ou finas crostas superficiais, que dificultam a passagem de água e as trocas gasosas com a atmosfera (Ferreira et al., 2010). Nesta condição, a infiltração de água é reduzida (Melo et al., 2008), promovendo o escoamento superficial que leva aos processos erosivos pela desagregação e transporte de sedimentos (Brandão et al., 2006), bem como o suprimento hídrico e gasoso das raízes fica comprometido (Beulter & Centurion, 2004; Michelin et al., 2009).

Isso demonstra que a qualidade do solo não deve ser negligenciada, pois, embora que os efeitos da degradação por sódio afetem mais significativamente as condições físicas do solo, seus danos são ampliados no contexto geral do solo e na sua interação com os elementos ambientais.

2.3. EFEITO DA SALINIDADE NAS PLANTAS

A salinidade e déficit hídrico é um dos mais evidentes estresses que limitam o desenvolvimento e produtividade das culturas e vem afetando os recursos naturais

em zonas áridas, semiáridas e mediterrâneas (Esteves & Suzuki, 2008; Guma et al., 2010).

As espécies cultivadas, quanto à salinidade, são classificadas em tolerantes ou sensíveis. Havendo variação de respostas de acordo com os níveis e tipos de sais, assim como entre e dentro das espécies vegetais. Portanto, nos genótipos mais sensíveis à salinidade advêm distúrbios fisiológicos (Freire & Rodrigues, 2009; Barros et al., 2009). A linha divisória entre essas culturas deve-se à capacidade de adaptação osmótica (Oliveira et al., 2007).

O estresse osmótico é o efeito mais marcante provocado pela salinidade nas plantas, que restringe a absorção de água pelos vegetais devido à diminuição do potencial osmótico na solução do solo. De acordo com as leis da termodinâmica, o potencial de energia de uma substância aumenta em função de sua concentração. E essa substância se moverá de áreas com potenciais maiores para aquelas com potenciais menores (Epstein & Bloom, 2006). A concentração de sais pode alcançar valores tão elevados que a planta eventualmente perderá água para o meio externo (Dias & Blanco, 2010).

Além desses efeitos osmóticos, quando a planta absorve os íons salinos, pode ocorrer toxidez na planta por excesso de sais absorvidos. Esses efeitos interferem no crescimento e desenvolvimento vegetal, afetando o funcionamento normal da atividade enzimática e, em consequência, processos fisiológicos e bioquímicos, tais como respiração, fotossíntese; síntese de proteínas e metabolismo de lipídios (Esteves & Suzuki, 2008; Freire & Rodrigues, 2009; Dias & Blanco, 2010; Gonçalves et al., 2011). Predominantemente, a toxidez é provocada pelos íons cloreto, sódio e boro, o acúmulo excessivo desses íons tóxicos contribui para aceleração dos processos de senescência e abscisão foliar (Munns, 2005).

A nível celular a toxidez causada pelo estresse salino é expressa através de desbalanço e danos ao citoplasma. Uma das respostas iniciais é a redução da expansão da superfície foliar, resultando em clorose marginal e apical nas folhas. Essa influência afeta consideravelmente seu desenvolvimento, e estimula respostas celulares ao estresse. São observados distúrbios na homeostase iônica, sobretudo pela redução K^+/Na^+ , com a diminuição do K^+ citosólico. Também há depleção no desenvolvimento de vacúolos, modificações no retículo endoplasmático, redução das cristas mitocondriais e fragmentação do tonoplasto (Dias & Blanco, 2010; Gondim et al., 2010).

As taxas fotossintéticas também são consideravelmente reduzidas com a ação do estresse salino sobre o potencial hídrico, essa condição desabilita a via do transporte de elétrons fotossintéticos por proteínas canais da membrana plasmática (Esteves & Suzuki, 2008).

Medeiros et al. (2009) concluíram que a cultura do pepino foi significativamente afetada por níveis de salinidade entre 1,5 e 6,5 dS m⁻¹. Já Costa et al. (2003) verificaram efeito negativo da salinidade sobre o crescimento, a área foliar e massa seca das raízes em plantas de feijão. Medeiros et al. (2008) estudando o efeito da salinidade sobre a cultura do melão, quando irrigaram as plantas com águas salinas, observaram redução na área foliar, fitomassa e taxa de crescimento absoluto.

Além de todos esses efeitos agindo diretamente sobre o desenvolvimento vegetal, Barros et al. (2009) destacam reações indiretas, oriundas dos efeitos dos sais sobre o solo. A estrutura de solos sódicos impede a germinação de sementes e o desenvolvimento de raízes, além de aumentar o consumo de energia da planta, representando sérios problemas para a produtividade agrícola.

2.4. MECANISMOS DE TOLERÂNCIA À SALINIDADE

O excesso de sais no meio, suscitando em um estresse salino, é reconhecidamente responsável pela promoção de efeitos negativos ao desenvolvimento da maioria das culturas. No entanto, algumas plantas possuem a habilidade de sobrevivência em condições adversas; com desenvoltura, por exemplo, na redução do potencial osmótico (Araújo et al., 2006), conseguindo, dessa forma, romper os efeitos da restrição de água e da presença de altas concentrações de sais e sódio do ambiente. Esse grupo de vegetais que respondem positivamente à salinidade é classificado como halófitas (Koyro, 2006).

As implicações adversas provocadas pela salinidade na agricultura recaem substancialmente sobre a produção agrícola (Läuchli & Grattan, 2007). Portanto, a ciência dos mecanismos envolvidos na susceptibilidade e tolerância às elevadas concentrações de sais, torna-se relevante na sustentabilidade e desenvolvimento da prática agrônômica (Prisco & Gomes Filho, 2010).

O conceito de tolerância à salinidade fundamenta-se na aptidão das plantas em se desenvolver sob condições de estresse salino (Munns, 2002). E para adaptação às condições adversas geradas pelos expressivos teores de sais do

sistema, as plantas halófitas possuem determinados mecanismos de sobrevivência (Zhu, 2001).

Na constituição geral da planta, a tolerância será ativada pela regulação do transporte dos sais, e é discriminada em cinco aspectos principais (Munns, 2002): o controle da absorção de sais, que é considerado o mais importante (Willadino & Câmara, 2005); o carregamento do xilema preferencialmente com K; a remoção do sal do xilema na parte superior das raízes, caule, pecíolo ou bainhas foliares (Munns, 2002); para evitar altas concentrações de sais nos órgãos no início de formação e com altas taxas fotossintéticas, a planta faz a translocação de Na⁺ e Cl⁻. Por último, as plantas halófitas promovem a excreção de Na⁺ e Cl⁻ pelas glândulas de sal (tricomas modificados) ou bexigas (células epidérmicas modificadas), com a tolerância do tecido ao acúmulo de Na⁺ ou Cl⁻ (Munns & Tester, 2008).

2.4.1. Ajuste Osmótico

As células vegetais são capazes de constituir um equilíbrio osmótico quando há o aumento da salinidade do solo. Essa alteração de energia no sistema confere a redução do potencial hídrico, dificultando, assim, o movimento de água e nutrientes através das membranas das raízes para o interior da célula (Ríos, 2004). Diante desse panorama, as halófitas promovem o ajuste osmótico através da absorção e acumulação de sais em suas folhas, esse é considerado um fator importante dentre os mecanismos de tolerância ao sal (Araújo et al., 2006). O processo se dá com a compartimentalização dos íons absorvidos nos vacúolos das células das folhas, e envolve uma rede de sobreposição de moléculas orgânicas, estabelecendo uma diminuição do potencial osmótico no citoplasma e nas organelas, mantendo o equilíbrio do metabolismo e das funções enzimáticas e a hidratação de proteínas das células (Dias & Blanco, 2010).

A tolerância ao estresse osmótico é verificada nas raízes e folhas jovens das plantas, alterando a expansão celular e promovendo o fechamento dos estômatos (Munns & Tester, 2008).

O ajustamento osmótico pelas plantas em resposta ao aumento da salinidade do solo tem correlação com uma alteração nas concentrações intracelulares (Ríos, 2004) de substâncias compatíveis com as enzimas e os metabólitos ali presentes (Munns, 2006), que são de natureza majoritariamente orgânica (Munns & Tester, 2008). Estes solutos orgânicos acumulam-se no citosol e organelas para equilibrar a pressão osmótica dos íons no vacúolo (Flowers et al., 1977), juntamente com função

de osmorregulação celular, o acúmulo desses compostos também confere a manutenção de estruturas subcelulares (Munns, 2002). E sua atuação está associada à retenção de água na região citoplasmática e ao armazenamento de sódio no apoplasto (Ashraf & Harris, 2004). Os compostos que se acumulam mais frequentemente são: a sacarose, prolina, e glicina betaína, sendo este conteúdo variável entre as espécies (Esteves & Suzuki, 2008).

A compatibilidade dos solutos orgânicos com as funções metabólicas da célula faz com que esses sejam acumulados no citosol e juntamente com a acumulação de íons no vacúolo, suscita o processo de estabilização dos potenciais hídricos entre o ambiente celular externo, o citosol e o vacúolo, de onde se deriva o ajuste osmótico (Prisco & Gomes Filho, 2010).

2.4.2. Compartimentalização de Sais

A alta concentração de sais na solução do solo acarreta em maior absorção de íons de sódio, os quais são direcionados às células radiculares por quatro vias principais: transportadores de potássio de alta afinidade (Silveira et al., 2010), sendo absorvido por competição com o íons K^+ (Mäser et al., 2002); os carreadores de cátions de baixa afinidade; e os canais de cátions insensíveis a voltagem e os não seletivos (Silveira et al., 2010).

Idealmente, as concentrações de sódio no citoplasma não devem ultrapassar a faixa de 0-10 mM (Prisco & Gomes Filho, 2010), pois concentrações elevadas desse íon tornam-se tóxicas, uma vez que devido a sua similaridade química com o potássio, acaba por interromper suas funções de ativação enzimática (Epstein & Bloom, 2006). Ao nível celular, a homeostase iônica torna-se indispensável, uma vez que o acúmulo de sal no citosol é prejudicial para a fisiologia normal das células vegetais (Willadino & Câmara, 2010).

É evidente a importância de alguns mecanismos de regulação e restrição do influxo e efluxo de sódio de modo a promover a alta relação K^+/Na^+ no citosol, mantendo a integridade das funções metabólicas.

O mecanismo de compartimentalização de Na^+ do citosol para o vacúolo ou para o meio externo celular, ocorre através do antiporte Na^+/H^+ , onde é aplicada uma força eletromotriz gerada pelas bombas de hidrogênio (H^+ -ATPase ou H^+ -PPiase) o que o qualifica essencial para a homeostase dos íons Na^+ e K^+ (Munns & Tester, 2008; Willadino & Câmara, 2010; Silveira et al., 2010). A atuação dessas bombas resulta no movimento de contra transporte, levando os íons Na^+ e H^+ a se moverem

em direções contrárias, gerando a exclusão do sódio citosólico. O sequestro de Na^+ do citoplasma para o apoplasto é regido por uma classe de sistema de antiporte denominada SOS1 (Salt Overly Sensitive 1) (Blumwald, 2000; Silveira et al., 2010; Willadino & Câmara, 2010). A compartimentalização vacuolar de Na^+ é resultante da atuação de transportadores Na^+/H^+ do tipo NHX (Munns & Tester, 2008), localizados no tonoplasto (Silveira et al., 2010).

Resumidamente, os mecanismos encontrados nas halófitas que as habilitam para sobrevivência em condições de salinidade podem ser reunidos entre adaptação osmótica; produção de osmólitos; adaptações estomáticas e enzimáticas, compartimentalização de íons salinos e os mecanismos biomoleculares.

A importância relativa destes diversos processos difere consideravelmente entre uma série de fatores; como os genótipos, os teores de sais, o tempo de exposição à salinidade, assim como, as condições ambientais locais.

2.5. A *Atriplex nummularia* Lindl.

Originalmente de zonas temperadas, subtropicais e mediterrâneas, particularmente na Austrália, o gênero *Atriplex* tem se desenvolvido bem onde usualmente ocorrem solos com características salinas e, ou, sódicas similares à região de origem; como as zonas de clima árido e semiárido da América do Sul, em especial a Argentina, o Chile e o Nordeste brasileiro.

É pertencente à família *Chenopodiaceae*, e esta compreende uma diversidade de espécies, estimando-se cerca de mais de 400 espécies (Araújo, 2003; Freire et al., 2010). Sua introdução no Brasil data da década de 30, sendo estabelecida no Nordeste Brasileiro pela Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas - DNOCS (Leal et al., 2008).

Essas halófitas são de hábito arbustivo (Freire et al., 2010), com crescimento erguido, ramificado desde a base (Alves et al., 2007), atingindo alturas superiores a 2 metros (Leal et al., 2008), possuem inflorescências nos terminais dos ramos, folhas verde acinzentadas, alternas, pecioladas, ovais e arredondadas (Aganga et al., 2003), com tricomas vesiculares esbranquiçados acumuladores de sal (Porto et al., 2006). Seu sistema radicular é composto de uma ramificação principal pivotante que alcança água em expressivas profundidades e raízes laterais que promovem o equilíbrio de absorção de nutrientes e sua estabilidade.

Taxonomicamente, enquadra-se na seguinte ordem de classificação: Reino *Plantae* - Subreino: *Tracheobionta* - Superdivisão: *Spermatophyta* - Divisão:

Magnoliophyta - Classe: *Magnoliopsida* - Subclasse: *Caryophyllidae* - Ordem: *Caryophyllales* - Família: *Chenopodiaceae* - Gênero: *Atriplex* spp. - Espécie: *Atriplex nummularia* Lindl.

A rusticidade característica do gênero *Atriplex* é refletida na amplitude de ambientes em que as suas espécies são encontradas, suportando desde zonas climáticas áridas e semiáridas, com restrita disponibilidade de água (Barroso et al., 2006), até áreas em condições ideais para a maioria das plantas cultivadas (Bonilla et al., 2000). Desenvolve-se bem em solos profundos, em regiões com 150 a 200 mm de precipitação anual, mas pode sobreviver bem com apenas 50 mm de precipitação anual (Aganga et al., 2003), por apresentar eficácia no uso da água, resultante do seu metabolismo C4; e sua característica de suculenta que está intimamente relacionada à salinidade.

O desenvolvimento da espécie em ambientes de características adversas (Carvalho Júnior et al., 2010) é devido a sua fisiologia, que possui dois mecanismos associados de tolerância à salinidade, sendo capaz de acumular sais no interior das células e eliminá-los através das folhas, por meio de vesículas especializadas localizadas em sua superfície. (Porto et al., 2006; Freire et al., 2010); características que lhe garantem posição de destaque entre as halófitas (Souza et al., 2011).

Por ser dotada de particularidades nas interações com as altas concentrações de sais no solo, que são mediadas por mecanismos de acumulação e exclusão de sais no seu interior, a *Atriplex nummularia* vem demonstrando alta afinidade com o processo de fitorremediação de solos afetados por sais, técnica que é empregada, justamente em áreas compatíveis com o habitat natural da espécie, que são zonas áridas e semiáridas; onde a presença de solos salinizados e, ou, sodificados é recorrente.

A habilidade de absorção de sais através do seu sistema fisiológico lhe rendeu a denominação vulgar de erva-sal. Adicionalmente, a *Atriplex* produz grande quantidade de biomassa e é hiperacumuladora de sais, atributos contemplados pelo processo de fitorremediação (Souza, 2010).

Além de apresentar esses mecanismos especializados (Porto et al., 2006), a *Atriplex nummularia* destaca-se também pelo seu potencial forrageiro (Souto et al., 2005), constituindo-se como fonte alternativa de alimentos (Ben Salem et al., 2004), podendo ser incorporada à alimentação animal na forma de feno, e com a finalidade de garantir o consumo e promover a neutralização do sal, o fornecimento deve ser aliado a outro tipo de volumoso (Porto & Araújo, 2000).

Nos últimos anos, a *Atriplex* tem sido utilizada em várias regiões áridas e semiáridas do mundo como um recurso forrageiro importante, com alto teor de proteína bruta variando entre 14 – 17 %, presente nas folhas (Alves et al., 2007), estabelecendo-se como uma importante fonte nutricional na complementação de dietas para ruminantes (Araújo & Porto, 2000; Souto et al., 2005) e na alimentação de ovelhas (Alves et al., 2007).

Desse modo, a halófito erva-sal (*Atriplex nummularia* Lindl.) constitui-se em uma cultura de importância nas áreas sob clima árido e semiárido, pelas suas potencialidades de sobrevivência e produção de material vegetal, caracterizando um bom potencial para a revegetação de solos degradados pela salinidade e sodicidade no mundo.

2.6. TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO DE SOLOS AFETADOS POR SAIS

O processo de salinização do solo muitas vezes está diretamente relacionado com o manejo inadequado do solo, em especial da irrigação. Diante da necessidade de produção, diferentes técnicas podem ser aplicadas no processo de recuperação, como o uso de vegetação halófito, aplicação de condicionadores químicos e orgânicos, lavagem do solo e técnicas de mecanização como aração e subsolagem. O emprego dessas técnicas envolvem aplicações teóricas e conhecimentos dos aspectos químicos e físicos do solo, assim como das interações irrigação-salinidade e produção-salinidade (Cavalcante et al., 2010).

2.6.1. TÉCNICAS CONVENCIONAIS

A recuperação de solos afetados por sais tem como objetivo principal a redução dos teores dos sais solúveis e do sódio trocável no solo, a uma condição que não comprometa o desenvolvimento das culturas (Barros et al., 2004).

A aplicação das diferentes técnicas empregadas na reabilitação dos solos salino-sódicos geralmente é feita de forma simultânea ou sucessiva. Essas são classificadas em fundamentais e auxiliares que, respectivamente, atuam diretamente na correção do problema e potencializam o efeito da correção (Montenegro & Montenegro, 2004; Cavalcante et al., 2010).

Entre as técnicas fundamentais, a lavagem do solo e a aplicação de corretivos químicos são as mais difundidas. Elas envolvem o processo de solubilização dos sais e deslocamento do teor de sódio trocável do complexo de troca pelo cálcio e a

consequente remoção pela água de percolação (Ribeiro et al., 2009; Cavalcante et al., 2010; Miranda et al., 2011).

Nos solos exclusivamente sódicos, o fundamento básico da recuperação está no fornecimento de cálcio ao sistema (Qadir et al., 2007). O aumento da concentração de Ca^{2+} na fase solúvel do solo provocará a translocação, por ação de massa, do Na^+ que predomina no complexo de troca.

Mineralogicamente, esses solos são pouco intemperizados com ocorrência de feldspatos potássicos, plagioclásios calco-sódicos e argilominerais montmorilonita e mica, cujas fontes de cálcio, a calcita e a dolomita, não fornecem suporte para afetar significativamente a recuperação desses solos, devido à baixa solubilidade (Qadir et al., 2007; Mota & Oliveira, 1999).

Nesse contexto, o emprego de condicionadores químicos como o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), enxofre elementar (S^0), sulfato de alumínio [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$], cloreto de cálcio (CaCl_2) e ácido sulfúrico (H_2SO_4), constitui uma alternativa para a recuperação química e física desses solos (Melo et al., 2008).

Entretanto, entre os vários corretivos que podem ser utilizados na recuperação de solos com excesso de sódio trocável, o gesso é o corretivo mais empregado, devido à simplicidade de manuseio, facilidade de se encontrar no mercado e baixo custo (Barros et al., 2009).

As principais áreas de ocorrência do gesso no Brasil são as reservas associadas às bacias sedimentares, especialmente a do Araripe (Melo et al., 2008). O Estado de Pernambuco possui na região do Pólo Gesseiro uma produção de 2,6 milhões de toneladas ano^{-1} , representando 95% de todo o gesso mineral brasileiro (Freire et al., 2007).

O gesso é um mineral que apresenta vários produtos de hidratação, sendo o mais comum a gipsita [$\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$]. Sua eficiência é determinada pelo grau de dissolução, que por sua vez sofre influência do método de aplicação e da composição granulométrica das partículas do gesso (Barros et al., 2004).

Diante da reconhecida eficiência do gesso e sabendo-se que a salinização e, ou, sodificação do solo é responsável pela redução na produção agrícola, culminando quase sempre com o abandono de áreas agricultáveis, o que causa prejuízos à economia regional (Melo et al., 2008), o gesso se caracteriza como o corretivo mais amplamente utilizado na recuperação de solos sódicos e salino-sódicos. É interessante que, ao se projetar um projeto de recuperação de solos com o emprego desse corretivo químico ou de outras técnicas, os fatores relacionados às

características da região e do solo, assim como a dos condicionadores a serem utilizados, sejam avaliados e compatíveis.

Os critérios estabelecidos no processo de remediação e no manejo de solos afetados por sais fundamentam-se no movimento de água no solo (Cavalcante et al., 2010), e objetivam propiciar condições favoráveis de umidade, aeração e balanço de sais ao sistema radicular das culturas. Logo, faz-se necessária a instalação de um sistema de drenagem subterrânea em áreas irrigadas, o que constitui uma das principais infraestruturas no processo de dessalinização dos solos, devido à baixa permeabilidade destes solos (Araújo et al., 2011).

Muitos autores destacam como desvantagens da aplicação dessas técnicas, os elevados custos e longo tempo de recuperação, especialmente quando as áreas são relativamente grandes e com maiores necessidades de corretivos, tornando-as prática onerosa e cronologicamente lenta, e, em alguns casos, precisa-se de mão-de-obra especializada (Barros et al., 2004; Cerda et al., 2007; Ravindran et al., 2007; Leite et al., 2010).

Araújo et al. (2011), estudando a viabilidade econômica do processo de recuperação de um solo sódico no Perímetro Irrigado Curu-Pentecoste-CE, afirmaram que é conveniente fazer estimativas de todos os custos envolvidos no investimento inicial, operação e manutenção, tal como as receitas geradas durante determinado período de tempo. Obtém-se assim, o fluxo de caixa financeiro relativo à atividade, permitindo o cálculo dos indicadores econômicos obtidos com o empreendimento. Os autores concluíram que a adição de gesso foi efetiva no processo de recuperação dos solos, no entanto, o tempo de retorno do investimento foi de nove anos, considerado longo.

Costa et al. (2005) detectaram viabilidade econômica em análise dos indicadores de rentabilidade do processo de recuperação de solos sódicos; contudo, os resultados indicaram um período de oito anos para recuperação de capital que, segundo os autores, é inviável para pequenos produtores da região, tornando impraticável o processo de recuperação de solos para estas condições.

Diante desse contexto, considera-se que, na grande maioria das vezes, algumas técnicas de recuperação de solos afetados por sais são inviáveis economicamente para pequenos agricultores de áreas degradadas pelos sais, os quais são sujeitos a uma série de limitações. Contrariando o objetivo original socioeconômico da recuperação das áreas degradadas do semiárido nordestino, a

falta de aplicabilidade das técnicas, não impõe barreiras ao abandono das terras afetadas e ao êxodo rural.

2.6.2. FITORREMEDIAÇÃO

Como as técnicas tradicionais de uso de corretivos químicos na recuperação de solos afetados por sais apresentam as desvantagens relatadas, seria necessário o desenvolvimento de técnicas alternativas que possibilitassem a melhoria da qualidade dos solos degradados pela salinidade.

É necessária a implementação de ações que forneçam o diagnóstico, o monitoramento do impacto e a remediação das áreas degradadas (Accioly & Siqueira, 2000), procurando identificar métodos que ofereçam, principalmente, eficiência na destoxificação, simplicidade na execução, menor tempo demandado pelo processo e menor custo. Nesse contexto, aumenta o interesse pela utilização da biorremediação (Coutinho & Barbosa, 2007).

Progressos efetivos têm ocorrido nos últimos anos na concepção dos processos envolvidos nas técnicas de fitorremediação, sobretudo em função do estudo e avaliação da interação entre o solo, a planta e os diferentes agentes de contaminação, como os sais, os metais, e elementos radioativos, por exemplo. E avanços desse tipo podem produzir sobre a fitorremediação potencial comercial. No entanto, muitas lacunas ainda persistem no conhecimento dos aspectos e interações químicas, microbianas e fisiológicas que ocorrem na rizosfera.

2.6.2.1. O conceito geral da fitorremediação

A técnica de biorremediação fundamenta-se na utilização de espécies vegetais (Belo et al., 2007), juntamente com a biomassa microbiana (Santos et al., 2011), amenizantes do solo, como corretivos, fertilizante, matéria orgânica (Pires et al., 2003), além de práticas agrícolas, para restringir a persistência dos contaminantes presentes no solo (Accioly & Siqueira, 2000).

A fitorremediação vem sendo desenvolvida em muitos países e também no Brasil (Santos et al., 2004; Procópio et al., 2005), e tem sido empregada há mais de 300 anos na Alemanha para o tratamento de esgoto municipal (Accioly & Siqueira, 2000). Nos Estados Unidos e Europa encontra-se mais difundida, especialmente na remediação de metais pesados (Santos et al., 2004).

Seu fundamento conceitual está na fisiologia vegetal, na bioquímica do solo e na química dos contaminantes, e deriva-se em dois processos padrões, o de fitodescontaminação, que se baseia na extração e degradação, e agrupa as técnicas de fitoextração, fitodegradação, fitovolatilização e fitoestimulação. E aquele que atua na imobilização dos poluentes, a fitoestabilização; essas são executadas como potencial para fitorremediação (Accioly & Siqueira, 2000).

Na fitoextração, as plantas agem removendo, armazenando, transferindo, estabilizando o contaminante na parte aérea. E a taxa de retirada do composto do solo depende da biomassa produzida ao final do ciclo do vegetal (Romeiro et al., 2007).

A fitovolatilização promove a volatilização de contaminantes. Empregada na fitorremediação de compostos orgânicos, na fitodegradação as plantas absorvem e metabolizam o contaminante. Outra possibilidade é a fitoestimulação, na qual os compostos existentes no solo são decompostos devido ao estímulo à atividade microbiana, promovido pela liberação de exsudatos radiculares das plantas (Accioly & Siqueira, 2000; Pires et al., 2003).

Pesquisas sobre a fitorremediação estão em constante desenvolvimento visando uma série de benefícios para o meio ambiente e para as futuras gerações (Coutinho & Barbosa, 2007). Constituindo-se como uma técnica em plena ascensão, de fácil implementação, de custo relativamente baixo e que não fornece riscos ao meio ambiente (Nascimento et al., 2009).

2.6.2.2. Fitorremediação de solos salinos, sódicos e salino-sódicos

Os estudos sobre fitorremediação em solos afetados por sais são encontrados na literatura desde os anos de 1920 e 1930, com trabalhos desenvolvidos por Kelley e associados (Qadir et al., 2007). Segundo Freire et al. (2010), Kelley & Brown (1934) desenvolveram estudos para tratamento de solo com a técnica em comparação ao gesso. A Cevada (*Hordeum vulgare* L.) foi a primeira cultura utilizada no tratamento com fitorremediação. No mesmo trabalho, ainda foram empregados, em diferentes épocas, cultivo de trevo de cheiro indiano (*Melilotus indicus* L.), trevo branco indiano (*M. albus* Medik.) e alfafa (*Medicago sativa* L.). Após o tratamento do solo, com cultivo de algodão (*Gossypium hirsutum* L.); foram alcançadas produtividades de 1,82 Mg ha⁻¹ para o tratamento com gesso e 2,10 Mg ha⁻¹ para o tratamento com fitorremediação.

A comunidade científica tem demonstrado resultados satisfatórios na recuperação de solos salinos e sódicos com a fitorremediação, o que tem demonstrado que o emprego de plantas como subsídio de descontaminação, qualifica a fitorremediação como uma técnica muito atraente e promissora (Qadir et al., 2007).

A presença de plantas halófitas no solo fornece uma série de benefícios que incluem os propósitos da fitoextração, diminuindo os teores de sais no solo pela absorção e extração dos íons tóxicos presentes no solo, além da capacidade de suas raízes de aumentar a concentração de cálcio na solução do solo, pela dissolução da calcita. As alterações nas propriedades físicas do solo oferecidas pela exploração das raízes são refletidas em uma adequada estruturação e maior agregação, facilitando a movimentação da água através do perfil do solo, potencializando assim a recuperação (Qadir et al., 2007; Leal et al., 2008).

A fitoextração em solos salino-sódicos apresenta efeitos de recuperação análogas aos tratamentos convencionais. Qadir et al. (2001) concluíram que a fitorremediação possui custo de implantação e condução inferior ao investido para tratamentos com os corretivos químicos.

O sucesso da fitoextração em solo salino-sódico está sujeito às características da espécie utilizada no processo, esta deve suportar altos níveis de salinidade e sodicidade, ser hiperacumuladora de sais e apresentar alta taxa de crescimento e produção de biomassa. É interessante que os genótipos sejam resistentes a pragas e doenças; apresentem sistema radicular abundante; de fácil aquisição ou multiplicação (Romeiro et al., 2007; Leal et al., 2008; Freire et al., 2010; Souza et al., 2011).

2.6.2.3. Configuração da interação solo-planta na fitorremediação

Ao se estabelecer no solo, a planta relaciona-se com o meio, promovendo alterações nas suas propriedades químicas, físicas e biológicas e recebendo a influência das mesmas sobre o crescimento e a capacidade de extração de sais, sendo de elevada importância o conhecimento dessas interações no processo de recuperação (Santos et al., 2011).

Os fatores relacionados à remoção de salinidade conjugam de forma associada a melhoria do solo através de mecanismos descritos por Qadir et al. (2007), listados a seguir:

- A química do sistema determina a cinética de dissolução e precipitação da calcita, que é expressa em função da pressão parcial de CO₂ na zona radicular pela respiração das raízes e aumento da atividade biológica com o cultivo das plantas, que em solos salinos e salino-sódicos e calcáreos libera ao solo íons Ca²⁺ para atenuar os efeitos sobre as propriedades físicas do solo e sobre as plantas.
- A liberação de prótons pelas raízes das plantas é outro mecanismo que atua na interface solo-raiz gerando um gradiente eletroquímico. O processo de absorção de cátions estimula a liberação de H⁺ mediante uma despolarização parcial do potencial da membrana, os íons H⁺ substituirão os íons Na⁺, que estarão prontamente disponíveis.
- O efeito físico das raízes está relacionado à influência no desenvolvimento de bioporos, a porosidade estrutural, interferindo diretamente sobre a condução da água no solo, que promove a percolação do Na⁺ ao longo do perfil. As raízes também promovem o incremento nos teores de matéria orgânica repercutindo em aumento da estabilidade de agregados.

Finalmente, os sais são retirados do solo pela sua absorção pelas plantas e acumulação na biomassa aérea produzida.

Destaca-se aqui a importância da retirada da matéria vegetal produzida do ambiente, por ser esta rica em sais extraídos do perfil do solo e, se for disposta na superfície, poderá aumentar ainda mais a concentração de sais nas primeiras camadas do solo.

6.2.4. Potencialidades da técnica

A fitorremediação exibe elevado potencial de implementação, devido às vantagens que apresenta em relação às outras técnicas de remediação de contaminantes do solo. Uma das principais vantagens da técnica é o menor custo em relação às técnicas convencionais, como por exemplo, as que são utilizadas envolvendo a remoção do solo para tratamento *ex situ* (Coutinho & Barbosa, 2007), constituindo-se em uma alternativa viável para agricultores descapitalizados.

Segundo Freire et al. (2010), o emprego da vegetação halófitas traz benefícios de diferentes aspectos, atuando nas propriedades químicas e físicas do solo e nas questões ambientais. Aumenta a disponibilidade de nutrientes, pelo incremento da

fertilidade do solo. A proliferação das raízes promovem fendas estruturais que permitem a recuperação do solo em profundidades maiores.

Por outro lado, o processo do sequestro de carbono pode ser acionado pela implantação e condução no campo dessa estratégia de recuperação em áreas com manchas de sais, sem vegetação. O retorno de plantas a essas áreas proporciona a melhoria da atividade biológica do solo por meio do enriquecimento em carbono, matéria prima para microrganismos que dela dependem, ou mesmo outros microrganismos adaptados a ambientes com excesso de sais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido no período de fevereiro de 2010 a agosto de 2011, totalizando dezoito meses de acompanhamento; implantado no lote 4-D, um dos 37 lotes do Perímetro Irrigado Cachoeira II, município de Serra Talhada, PE. A área fica na mesorregião do Sertão do Alto Pajeú, em solo salino-sódico, caracterizado por Fernandes (2008). O Perímetro localiza-se nas coordenadas geográficas: 7° 58' 54" a 8° 01' 36" de Latitude Sul e 38° 18' 24" a 38° 21' 21" de Longitude Oeste, a jusante do Açude Cachoeira II, que semipereniza o Riacho Cachoeira, um dos afluentes do Rio Pajeú (Figura 1).

3.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O Perímetro Irrigado Cachoeira II, ocupa uma área referente a 378,14 ha com 60% da área total sendo utilizada com irrigação. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima é do tipo BShw (BSh = clima seco de estepes de baixas latitudes; w = com chuvas de verão retardadas para o outono) (DNOCS, 1999).



Figura 1. Localização geográfica da área experimental.

O clima da região onde se localiza o perímetro irrigado é semiárido muito quente, a temperatura média anual de 25,9° C e precipitação média anual de 887,9 mm. As precipitações concentram-se nos meses de dezembro a maio, representando 85% da média anual (APAC, 2011). O solo no perímetro está distribuído entre Argissolos Vermelho–Amarelos, Latossolos Vermelho-Amarelo, Luvisolos, Neossolos e Cambissolo (Almeida et al., 2006).

Os dados pluviométricos do período de condução do experimento foram coletados na estação climatológica do IPA (Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária), próxima a área experimental.

3.3. TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Foram estabelecidos quatro tratamentos: (1) solo cultivado com plantas de *Atriplex* no espaçamento 1 x 1 m; (2) plantas de *Atriplex* no espaçamento 2 x 2 m; (3) aplicação de gesso com incorporação manual em solo não cultivado; e (4) solo não cultivado (tratamento controle). A área do experimento (Lote 4D) é plana e localizada nas proximidades da BR 232 e do Riacho Cachoeira, sendo os tratamentos dispostos em delineamento experimental em blocos ao acaso com

quatro repetições. Em cada bloco foram montadas parcelas experimentais de 36 m² (6 x 6 m), com parcela útil de 4 m² (2 x 2 m).

3.4. MONTAGEM E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

O solo da área experimental foi classificado como CAMBISSOLO FLÚVICO conforme Sistema Brasileiro de Classificação de solos (EMBRAPA, 2006), encontrando-se em elevado grau de salinização e sodificação. O experimento foi conduzido no período de fevereiro de 2010 a agosto de 2011, totalizando dezoito meses de acompanhamento.

Nos tratamentos de fitorremediação foram utilizadas mudas de *Atriplex nummularia* Lindl com idade de 90 dias e cerca de 30 cm de altura, tendo sido propagadas por estaquia de uma única planta matriz em substrato preparado a partir de composto orgânico e areia (1:1). O transplântio foi realizado manualmente, com uma planta por cova, colocando-se apenas o torrão da muda, sem a aplicação de fertilizantes. Logo após o transplântio das mudas foi realizada uma irrigação manual na cova, mantendo-se uma irrigação semanal nos primeiros 30 dias para o estabelecimento das mudas.

No tratamento com cultivo de *Atriplex* no espaçamento 1 x 1 m a parcela foi montada com 36 plantas, definindo-se como parcela útil as quatro plantas centrais (Figura 2); e no tratamento com as plantas espaçadas de 2 x 2 m, a parcela total foi composta de nove plantas e com a parcela útil contendo uma planta central (Figura 3).

No tratamento de correção química com aplicação de gesso, a necessidade de aplicação do corretivo foi de 13,89 Mg ha⁻¹, calculada segundo Vitti et al. (1995) pela expressão: $NG = [(PSTi - PSTf0 \times CTC \times 86 \times h \times d)]/100$, a partir dos dados das análises de caracterização de amostra do solo tomada antes da montagem do experimento. Todo o gesso foi aplicado a lanço e incorporado manualmente, com o uso de enxada, a 20 cm de profundidade. O tratamento testemunha foi mantido sem nenhum manejo, servindo de referencial comparativo com os demais.

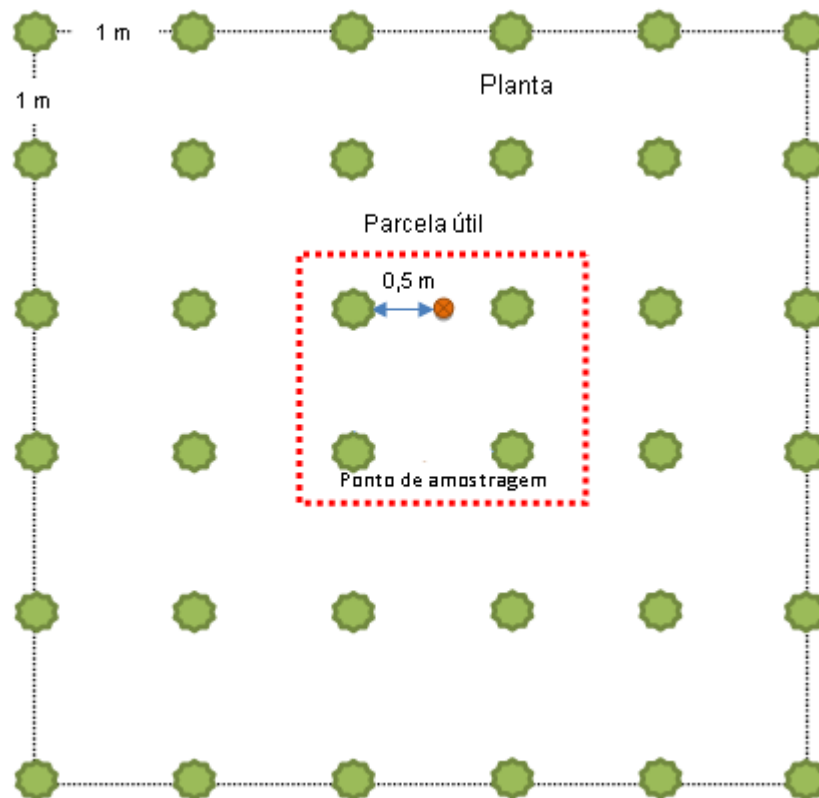


Figura 2 – Visão superior da parcela experimental, parcela útil e localização dos pontos de amostragem do solo em relação à planta de *Atriplex nummularia* no espaçamento 1 x 1 m.

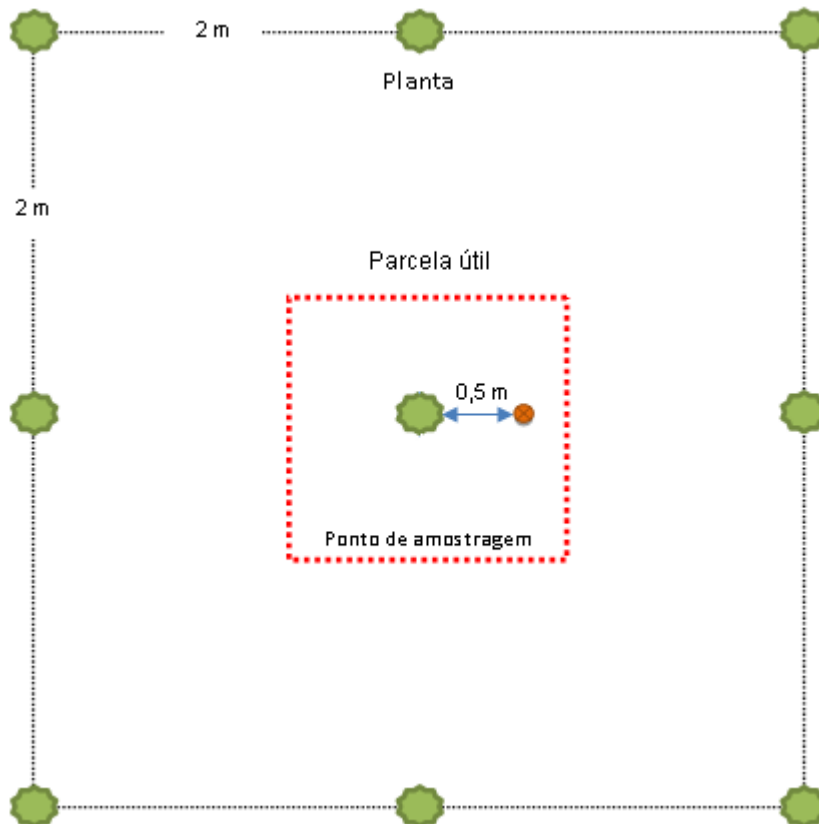


Figura 3 – Visão superior da parcela experimental, parcela útil e localização dos pontos de amostragem do solo em relação à planta de *Atriplex nummularia* no espaçamento 2 x 2 m.

3.5. COLETA E AVALIAÇÃO DAS PLANTAS

Para avaliação do crescimento da planta, com a utilização de trena e régua, foram realizadas medidas de altura e diâmetro da copa nos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste, aos dois, cinco, seis, sete, oito, nove, dez, onze, doze e dezoito meses após o transplântio (MAT). E a cada seis meses, as plantas eram podadas a 50 cm de altura e diâmetro dos ramos nos mesmos sentidos, deixando-se a copa arredondada.

A biomassa obtida após a poda foi fracionada em folhas e ramos, sendo o material vegetal coletado pesado e, posteriormente, seco em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C, até peso constante. Com isso foram obtidas as massas fresca e seca da parte podada das plantas.

A massa seca de cada parte (folha e ramo) foi moída em moinho tipo Willey e submetida à digestão nitroperclórica (Silva, 2009). A determinação dos teores de sódio e potássio foi realizada por fotometria de emissão de chama e os teores de cálcio e magnésio por espectrofotometria de absorção atômica. O cloreto foi determinado por extração em água e titulação com nitrato de prata (Malavolta et al., 1997). Para o nitrogênio, as amostras passaram pela digestão sulfúrica a quente e a determinação foi feita pelo método semi-micro-Kjeldahl (Malavolta et al., 1997). O teor de proteína bruta (PB) foi estimado a partir dos dados de nitrogênio pelo fator de conversão de 6,25 (Galvani & Gaertner, 2006).

3.6. COLETA E ANÁLISES DE SOLO

As coletas de solo foram realizadas a uma distância lateral de 0,5 m em relação ao caule da planta central, no espaçamento 2 x 2 m (Figura 3). No espaçamento 1 x 1 m, a coleta das amostras de solo também foi feita a 0,5 m do caule (Figura 2). Para os tratamentos gesso e controle, como não havia plantas cultivadas, o centro da parcela serviu como referência para as distâncias do caule, sendo as amostragens de solo realizadas também na parcela útil.

Foram realizadas quatro amostragens: no momento da montagem do experimento (fevereiro de 2010), aos seis (agosto de 2010), doze (fevereiro de 2011) e dezoito (agosto de 2011) meses de montagem do experimento. Nas três primeiras amostragens, foram coletadas amostras com estrutura deformada, em quatro diferentes profundidades no perfil de solo: na crosta superficial (2 mm) e nas camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm. E na quarta amostragem, a coleta constou de

amostras com estrutura deformada nas mesmas profundidades e amostras com estrutura preservada, coletadas em cilindros volumétricos, nas profundidades de 0-5, 15-20, 40-45 e 75-80 cm. As amostras de solo com estrutura deformada e preservada foram coletas no mesmo ponto amostral.

Após a coleta, as amostras de solo com estrutura deformada foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm, obtendo-se assim a Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) e reservada para a realização das análises físicas e químicas.

3.6.1. ANÁLISES FÍSICAS

a) Granulometria do solo e argila dispersa em água

A análise granulométrica fundamentou-se na quantificação dos teores das frações primárias do solo, determinados por metodologia proposta por Ruiz (2005).

A análise consistiu na pesagem das amostras de solo (TFSA) e posterior dispersão/separação das frações primárias do solo, essa feita através de agitação mecânica lenta, com agitador tipo Wagner, e quimicamente com aplicação NaOH 0,1 mol L⁻¹. Devido à elevada concentração eletrolítica da solução do solo, foi necessária aplicação de pré-tratamento, realizada através da lavagem do solo com álcool a 96%.

Tabela 1. Composição granulométrica (n = 64 amostras) e classe textural do solo da área experimental.

Profundidade cm	Composição granulométrica					Classe textural
	Areia			Silte	Argila Total	
	Grossa	Fina	Total			
	g kg ⁻¹					
0-5	61,89	463,878	525,768	377,905	96,33	Franco arenoso
15-20	54,39	432,42	493,73	374,38	131,89	Franco arenoso
40-45	65,76	392,54	458,30	360,46	181,24	Franco arenoso
75-80	59,32	354,39	413,71	381,71	204,59	Franco

A argila dispersa em água foi determinada pelo método da pipeta após agitação lenta (16 horas) (Ruiz, 2005). Com os dados de argila dispersa e argila total foram calculados os índices de dispersão e floculação.

b) Densidade do solo e densidade de partículas

A densidade do solo foi determinada utilizando-se amostras de solo não deformadas, coletadas em cilindros volumétricos, seguindo metodologia descrita pela EMBRAPA (1997). A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997).

c) Condutividade hidráulica de solo em meio saturado (K_0)

Para a determinação da condutividade hidráulica do solo em meio saturado em laboratório, foram utilizadas amostras de solo com estrutura preservada (anéis volumétricos). Em laboratório, as amostras foram preparadas (toailete) retirando-se cuidadosamente o excesso de solo das faces superior e inferior dos anéis. Para evitar perdas de solo durante o processo de saturação e manuseio das amostras, a parte inferior foi vedada com tecido permeável à água.

Em seguida, as amostras foram submetidas à saturação por capilaridade, de modo a preservar a interconexão dos poros, durante 48 horas e, posteriormente, submetidas ao teste de condutividade hidráulica pelo método do permeâmetro de coluna vertical e carga constante (EMBRAPA, 1997).

d) Porosidade total, macro e microporosidade

Posteriormente à condutividade hidráulica em meio saturado, as amostras foram saturadas novamente por capilaridade durante 24 horas e submetidas a diferentes tensões de água no solo: 1, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm de coluna d'água em mesa de tensão.

A separação da porosidade total (Pt) em macro e microporos foi feita com a drenagem da água dos macroporos usando a sucção de -6 kPa na mesa de tensão, medindo-se o volume de água que permaneceu na amostra, similar ao volume de microporos, obtendo-se assim a microporosidade (Micro). Conhecendo-se a Pt e Micro, a macroporosidade (Macro) foi obtida por diferença .

3.6.2. ANÁLISES QUÍMICAS

Para a caracterização química, foi realizada a medida do pH em água (1:2,5); a determinação dos cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+), extraídos com acetato de amônio 1 mol L^{-1} a pH 7,0 (Thomas, 1982), sendo Na^+ e K^+ dosados por fotometria de chama e Ca^{2+} e Mg^{2+} por espectrofotometria de absorção atômica (USSL Staff, 1954).

A capacidade de troca de cátions (CTC) pelo método do acetato de sódio/acetato de amônio, calculando-se a percentagem de sódio trocável (PST) do solo pela equação (USSL Staff, 1954):

$$\text{PST} = (\text{Na}^+/\text{CTC}) \times 100$$

Para a avaliação da solução do solo, foi preparada a pasta de saturação e, no extrato obtido, foram realizadas as medidas de pHes e CEes (condutividade elétrica) do extrato de saturação.

No mesmo extrato, foram realizadas as determinações dos íons Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ solúveis; sendo Na^+ e K^+ dosados por fotometria de chama; e Ca^{2+} e Mg^{2+} por espectrofotometria de absorção atômica (USSL Staff, 1954); calculando-se a relação de adsorção de sódio:

$$\text{RAS} = \text{Na}^+ / [(\text{Ca}^{2+} \text{ e } \text{Mg}^{2+})/2]^{0,5}$$

Os ânions Cl^- , CO_3^{2-} e HCO_3^- foram determinados por titulometria (EMBRAPA, 1997).

3.7. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As variáveis avaliadas foram submetidas à análise da variância em função dos fatores tratamento, tempo e profundidade, considerando-se os que foram significativos. As médias das variáveis significativas foram submetidas ao teste de Tukey ($P < 0,05$), utilizando o software SAEG 9.1 (UFV, 2007).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CRESCIMENTO DA PLANTA

A taxa crescimento das plantas é uma variável importante no entendimento dos mecanismos fisiológicos responsáveis pela tolerância à salinidade das espécies. Na simples análise da resposta de uma planta ao estresse salino, a correlação entre o crescimento e o efeito osmótico do sal no solo ou o efeito tóxico do sal dentro da planta torna-se relevante na avaliação do desenvolvimento vegetal.

A altura das plantas de *Atriplex nummularia* Lindl ao longo do tempo, quando submetidas ao cultivo nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m não foi diminuída pela alta concentração de íons no solo, independentemente da fase de desenvolvimento da cultura (Figura 4). O acréscimo em altura dos dois aos seis primeiros meses após o

transplântio (MAT) foi de 95,39% e 134,75% nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m, respectivamente.

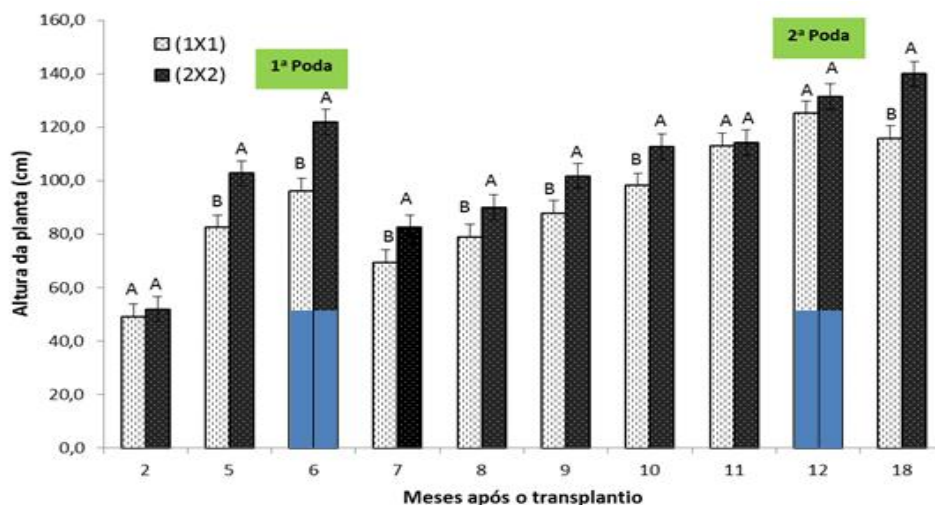


Figura 4 - Altura de plantas de *Atriplex nummularia* Lindl (cm) em função do tempo após o transplântio (meses) nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade entre os tratamentos nas diferentes épocas de avaliação.

Foi observada diferença significativa ($P < 0,05$) entre os tratamentos para a variável altura a partir dos 5 meses de cultivo, com as plantas submetidas ao tratamento no espaçamento 2 x 2 m apresentando altura média superior às plantas no espaçamento 1 x 1 m, possivelmente, pela limitação de crescimento nas plantas sob o tratamento de menor espaçamento.

Aos seis MAT as plantas foram podadas, sendo retirado todo material vegetal acima dos 50 cm de altura, objetivando estimular um desenvolvimento vegetal mais pronunciado. Depois da primeira poda, foi verificado um desenvolvimento crescente das plantas, similar ao do primeiro semestre de cultivo, com diferença significativa entre os espaçamentos nos quatro primeiros meses de cultivo após a poda (sete, oito, nove e dez MAT), correspondentes a 15,91, 12,24, 13,7 e 12,97%, respectivamente.

Entretanto, no quinto e sexto mês após a primeira poda (11 e 12 MAT) não houve diferença significativa ($P > 0,05$) na taxa de crescimento das plantas adensadas se comparadas às plantas mais espaçadas, com 1,04% de diferença de altura nos onze MAT e 4,79% nos doze MAT, demonstrando equilíbrio entre as plantas sob os dois espaçamentos. Isso pode ser atribuído à altura alcançada acima de 120 cm, aproximando-se da média para plantas desta espécie, que é de 1,50 m (Brilhante, 2006).

De modo geral houve um ganho médio na altura do sexto ao décimo segundo MAT de 60,07% para o tratamento no espaçamento 1 x 1 m e de 61,98% para o espaçamento 2 x 2 m, mostrando que neste período o crescimento foi menos pronunciado, embora tenha sido mantida a faixa de altura superior ao do período que antecedeu à poda.

A importância relativa dos diversos processos de manutenção do crescimento tem uma grande amplitude de respostas, variando em função das espécies, ou, até entre os genótipos de uma mesma espécie. Diferindo também em relação ao tempo de exposição à salinidade, à concentração do sal, e, possivelmente, às condições ambientais locais (Araújo et al., 2006).

Existem relatos de maiores alturas em plantas de *Atriplex*, como o trabalho desenvolvido por Porto et al. (2001), trabalhando com plantas de *A. nummularia* irrigadas semanalmente com águas de rejeito de salinização e cultivadas no espaçamento 3 x 3 m, verificando que as plantas alcançaram uma altura média de 2,20 m após um ano, sem serem submetidas a cortes; e Glenn et al. (2009), trabalhando com *A. lentiformis* irrigada com águas residuárias, observaram que as plantas atingiram altura máxima de 3 m após 5 anos de cultivo, também sem cortes. Nos dois casos relatados, as plantas não foram podadas, diferindo deste trabalho, em que se pretendia avaliar a capacidade de rebrota destas plantas após podas sucessivas, que promoveriam retiradas mais expressivas de sais do solo.

Aos doze MAT foi realizada uma segunda poda, e só voltando a medir a altura e apenas, após um período de seis meses (18 MAT). Observou-se que a recuperação da altura das plantas podadas foi mais rápida, sobretudo para o tratamento com cultivo de *Atriplex* no espaçamento 2 x 2 m, que superou o tratamento no espaçamento 1 x 1 m, como nas outras épocas de medição. Aos 18 MAT, a altura das plantas no espaçamento 2 x 2 m superou a da primeira e segunda época de medição (6 e 12 MAT) com um percentual de ganho de 12,86 e 6,07% em relação a primeira e segunda época de monitoramento, respectivamente. No espaçamento 1 x 1, foi observado ganho de altura apenas entre os 6 e 18 MAT. Neste caso, justifica-se pelo sistema radicular já estabelecido nas plantas com 18 meses, possibilitando maior exploração do perfil do solo e, com isso, mais efetividade na absorção de água e nutrientes, refletindo no crescimento das plantas.

Fundamentado nesses resultados, pode-se evidenciar a capacidade de rebrota da *Atriplex nummularia*, assim como observado por Souza et al. (2010), no seu estudo com a espécie citada comparando plantas podadas com não podadas e

verificando significativa capacidade de recuperação das plantas quando submetidas à poda.

No entanto, o crescimento da copa da atriplex também é radial, possibilitando maior produção de biomassa em plantas com elevados valores de diâmetro da copa.

Assim, na avaliação do diâmetro da copa das plantas nos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste, também foram observadas diferenças entre as plantas sob os espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m, em que as mais distanciadas atingiram maiores diâmetros nos dois sentidos a partir dos seis MAT (Figuras 5 e 6).

Houve um crescimento contínuo no diâmetro da planta nos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste, com diferenças entre os espaçamentos ($P < 0,05$) a partir dos 6 MAT. No mesmo mês foi realizada uma poda, deixando a copa com diâmetro de 50 cm nos dois sentidos, sendo as diferenças mais uma vez observadas a partir segundo mês após a poda (8 MAT).

Aos 12 MAT as plantas foram submetidas à segunda poda, e a avaliação realizada aos 18 MAT foi a que teve maior diferença entre as plantas nos dois espaçamentos. Nesta última avaliação, o crescimento das plantas foi superior às duas primeiras, sendo de 81,75 e 18,79%, no sentido Norte-Sul e de 87,0% e 21,04%, no sentido Leste-Oeste em relação aos respectivos períodos de 6 e 12 MAT.

Estes resultados evidenciam o efeito favorável da prática da poda no crescimento das plantas de *Atriplex nummularia* Lindl, além da renovação dos brotos da planta pelo estímulo dos cortes sucessivos.

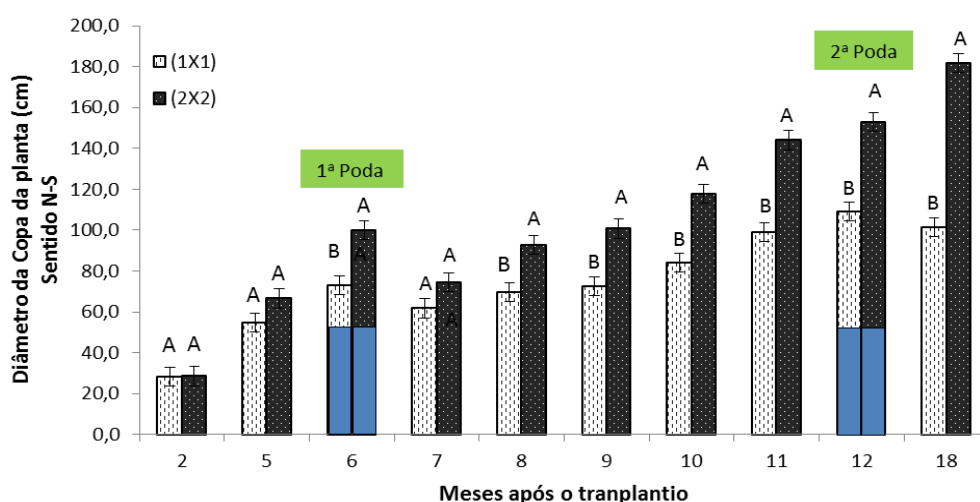


Figura 5 - Diâmetro da copa de plantas de *Atriplex nummularia* Lindl (cm) no sentido Norte-Sul em função do tempo após o transplante (meses) nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade entre os tratamentos nas diferentes épocas de avaliação.

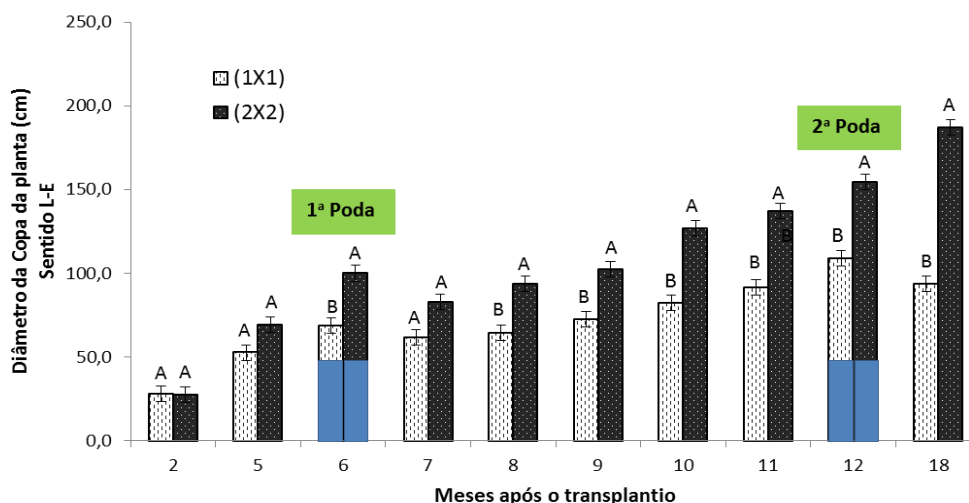


Figura 6 - Diâmetro da copa de plantas de *Atriplex nummularia* Lindl (cm) no sentido Leste-Oeste em função do tempo após o transplântio (meses) nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade entre os tratamentos nas diferentes épocas de avaliação.

As plantas do tratamento com cultivo de atriplex no espaçamento 2 x 2 m superaram as do tratamento no espaçamento 1 x 1 m nas variáveis altura de planta e diâmetro da copa nos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste em todas as épocas de medição, indicando a influência da densidade de plantas por área sobre a produtividade dos cultivos. No entanto, em geral, as plantas apresentaram um bom desenvolvimento, demonstrando que a *Atriplex nummularia* Lindl pode ser considerada como uma cultura com habilidade de habitar em ambientes com excesso de sais e deficiência hídrica, se comparada a outras culturas, possibilitando a cobertura vegetal em áreas degradadas pela salinidade.

Munns (2005) afirmam que o efeito osmótico, provocado pela alta concentração de sal em torno das raízes, reduz significativamente a taxa de crescimento da parte aérea das plantas sensíveis à salinidade. Um aumento repentino na salinidade do solo faz com que as células das folhas percam temporariamente o turgor; ocorrendo ainda diminuição na taxa de aparecimento das folhas novas e desenvolvimento das gemas laterais, diminuindo a quantidade de ramos ou brotos laterais.

Esses mesmos autores afirmam ainda que plantas com habilidade em tolerar a pressão osmótica e o acúmulo de Na^+ nos tecidos mostram um aumento na capacidade de manter o crescimento. E salientam que a expressão dos efeitos se dá distintamente entre os tecidos jovens e velhos. Maior tolerância osmótica será

manifestada por um aumento da capacidade da produção de folhas novas, enquanto que a tolerância do tecido revela-se principalmente pelo aumento na sobrevivência das folhas mais velhas.

As halófitas apresentam uma fisiologia controversa aos efeitos provocados pela presença de sais no meio. Nesse grupo de plantas observam-se diferentes estratégias para manutenção da integridade do seu processo de desenvolvimento (Munns & Tester, 2008).

No caso da *Atriplex nummularia*, a espécie é dotada de habilidades que garantem sua habitação em condições de alta salinidade. Controlando a pressão osmótica, a planta equilibra a absorção de Na^+ com outros íons nas células, garantindo o movimento da água na planta e vencendo o baixo potencial hídrico externo, resguardando, assim, a homeostase intracelular (Yokoi et al., 2002; Azevedo et al., 2005, Silva et al., 2009). A compartimentalização do Na^+ é outro mecanismo de importância, mantendo altas as relações, a nível celular, entre os íons essenciais e o sódio. Além disso, um mecanismo muito difundido e eficaz é a eliminação dos sais por meio de vesículas especializadas existentes na superfície das folhas, onde o sal cristaliza (Souza et al., 2011).

Esses relatos condizem com a pesquisa de Porto et al. (2006), onde afirmaram que a atriplex, como outras espécies halófitas, tem habilidade de suportar não apenas altos níveis de salinidade do complexo solo-água mas, também, de acumular significativas quantidades de sais em seus tecidos. Fato que é reforçado por Leal et al. (2008), testando o potencial fitoextrator da *Atriplex*, que observaram que a espécie tem capacidade de crescimento em solo com CE média de 25,94 dS m^{-1} e PST média de 51,61%, demonstrando seu potencial para ocupar áreas degradadas por sais onde outras plantas não teriam condições de crescimento, podendo ser considerada uma alternativa economicamente viável para a recuperação da capacidade produtiva dessas áreas.

Tal suposição é corroborada pelo estudo de Araújo et al. (2006), trabalhando com plantas de *Atriplex nummularia* cultivadas em níveis crescentes de NaCl , que verificaram estimulação do crescimento a medida que aumentava a concentração dos íon Na^+ e Cl^- na solução, até o nível de 300 mmol L^{-1} . Esses autores afirmam que a estimulação do crescimento depende do regimento ordenado das funções metabólicas para que sejam rompidas as condições limitantes promovidas pela salinidade. E observaram que, em concentrações acima de 300 mmol L^{-1} , a coordenação do metabolismo foi rompida, com subsequente redução no crescimento

dos exemplares de *Atriplex nummularia* provocada pela quebra da homeostase celular. Os autores relataram ainda que os mecanismos fisiológicos de estimulação do crescimento de plantas de *Atriplex* ainda são desconhecidos, e que o tema constitui-se em um dos mais convenientes para investigação das propriedades das halófitas no reino vegetal.

4.2. PRODUÇÃO DE BIOMASSA

A interferência que a salinidade provoca sobre as plantas tem efeito direto e negativo sobre os processos de crescimento, de forma que a produção de biomassa está entre os critérios para avaliação do grau de estresse e da capacidade de adaptação da planta à salinidade (Leal et al., 2008).

A produção de matéria fresca e seca da parte aérea teve significância para o fator poda e para os espaçamentos, não havendo efeito significativo para a interação poda x espaçamento (Tabela 2).

Com os resultados de produção de matéria fresca e seca por planta e o número de plantas por hectare em cada espaçamento, foram estimadas as produções totais de folhas, ramos e de toda a planta das três podas (Tabela 3). Apesar das plantas cultivadas no espaçamento 1 x 1 m terem um menor crescimento, a produção de matéria fresca e seca de ramos e folhas em todas as podas foram superiores às das plantas menos adensadas (2 x 2 m).

Tabela 2 - Níveis de significância para a produção de matéria seca da folha (MSF), matéria seca do caule (MSC), matéria fresca da folha (MFF) e matéria fresca do caule (MFC) (kg planta⁻¹), considerando-se os efeitos de poda e espaçamento

Efeito	MSF	MSC	MFF	MFC
Poda	**	**	**	**
Espaçamento	**	**	**	**
Poda x Espaçamento	ns	ns	ns	ns
CV (%)	19,65	17,5	16,43	14,04

**Significativo a 5% de probabilidade pelo teste Tukey; ns não significativo.

Tabela 3 – Estimativa dos rendimentos de folhas, ramos e total de plantas de *Atriplex nummularia* Lindl (Mg ha⁻¹) submetidas a podas sucessivas, cultivadas nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m nas três podas realizadas ao longo do cultivo.

Tratamento		Matéria fresca			Matéria seca		
		Folhas	Ramos	Produção da planta	Folhas	Ramos	Produção da planta
		Mg ha ⁻¹					
1 x 1	1 ^a Poda	2,98 Ab	1,93 Ab	4,08	0,75 Ab	0,56 Ab	1,31
	2 ^a Poda	13,21 Aa	7,53 Aa	20,74	2,87 Aa	3,52 Aa	6,39
	Poda Final	10,34 Aa	5,73 Aab	16,08	2,61 Aa	2,22 Aab	4,83
	Produção total	26,55	14,36	40,90	6,23	6,31	12,54
2 x 2	1 ^a Poda	1,55 Bb	0,40 Bb	1,95	0,36 Bb	0,20 Bb	0,56
	2 ^a Poda	7,89 Ba	4,12 Ba	1,20	1,88 Ba	2,20 Ba	4,09
	Poda Final	4,86 Ba	2,30 Bab	7,16	1,46 Ba	1,20 Bab	2,67
	Produção total	14,29	6,82	21,12	3,70	3,63	7,33

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem entre si em função dos tratamentos. Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre si em função da poda aplicada, pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

Porto et al. (2001) afirmam que a variabilidade de rendimento está entre 2,9 a 10,0 Mg ha⁻¹ de matéria seca da *Atriplex nummularia*, e atribuem essas diferentes respostas à qualidade do ambiente e a práticas de manejo; como espaçamento, lâmina d'água, altura e periodicidade do corte.

A produção total de massa seca das plantas com densidade de plantio de 10.000 plantas ha⁻¹ (espaçamento 1 x 1 m) foi superior à do tratamento com 2.500 plantas ha⁻¹ (espaçamento 2 x 2 m), correspondendo a 12,54 e 7,33 Mg ha⁻¹ ao longo dos dezoito meses de cultivo (três podas). Diante do melhor desempenho na produção de biomassa, o plantio da atriplex no espaçamento 1 x 1 m pode ser considerado mais interessante, pois ofereceu um rendimento superior aos padrões relatados na literatura. Resultado relevante para o cultivo de plantas forrageiras na região semiárida, já que, neste espaçamento, há redução da área útil utilizada para o cultivo, proporcionando uma economia expressiva por tonelada de matéria seca produzida por hectare, além de promover maior cobertura e proteção ao solo.

Glenn et al. (2009) submeteram plantas de *Atriplex* a uma densidade de plantio próxima ao do presente estudo (espaçamento 1,8 x 1,8 m), por um período de cinco anos de cultivo e obtiveram rendimentos que variaram de 14,00 a 18,00 Mg ha⁻¹. Já Barroso et al. (2006), trabalhando no espaçamento 4 x 4 m conseguiram rendimentos variando entre 7,50 e 11,42 Mg ha⁻¹. Resultados similares foram obtidos por Porto et al. (2006), cultivando plantas de *Atriplex* irrigadas com água de

dessalinização com valor médio de CE de $8,29 \text{ dS m}^{-1}$, alcançado uma produtividade equivalente a $13,82 \text{ Mg ha}^{-1}$ no espaçamento $4 \times 4 \text{ m}$. Vale-se ressaltar que no presente estudo as plantas só foram irrigadas no primeiro mês, até o pegamento das mudas. A partir daí, foram mantidas em campo sem o recurso da irrigação, ou seja, sem custos de manejo.

O emprego da poda foi efetivo na estimulação de produção de biomassa, com aumento percentual do material seco originário da prática. Assim, na segunda coleta foi observado um incremento de 79,69% no espaçamento $1 \times 1 \text{ m}$ e de 86,50% no espaçamento $2 \times 2 \text{ m}$ em relação ao material obtido na primeira poda. Semelhantemente ao que ocorreu na pesquisa de Souza et al. (2010), que avaliaram a produção de massa seca da *Atriplex nummularia* em condições de campo, com espaçamento de $2,5 \times 2,5 \text{ m}$ com três cortes em alturas de 80-60 cm ao longo de 16 meses de cultivo e encontraram produtividade de $8,61 \text{ Mg ha}^{-1}$, sendo $7,60 \text{ Mg ha}^{-1}$ proveniente de rebrota (97,44%).

Salienta-se ainda a qualidade do material produzido após a rebrota, ou seja, além de promover o aumento na produção, a poda incita o surgimento de brotações novas, principalmente folhas e ramos menos lignificados, material de maior palatabilidade pelos animais (Souza, 2010).

Quando a variável avaliada foi produção de biomassa em kg planta^{-1} (Tabela 4), foi verificado um efeito de resposta inverso, ou seja, no espaçamento $2 \times 2 \text{ m}$ as plantas tiveram a maior produção nas partes estudadas e no total do que no espaçamento $1 \times 1 \text{ m}$. Esses melhores resultados podem ser justificados pela menor concorrência entre plantas por água, luz e nutrientes com o maior espaçamento, possibilitando maior produção da matéria vegetal por planta.

Tabela 4 – Produção de massa fresca e seca de folhas e ramos de plantas de *Atriplex nummularia* (kg planta⁻¹) submetidas a podas sucessivas cultivadas nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m

Tratamento		Matéria fresca			Matéria seca		
		Folhas	Ramos	Produção da planta	Folhas	Ramos	Produção da planta
		kg planta ⁻¹					
1 x 1	1 ^a Poda	0,30 Bb	0,11 Bb	0,41 Bb	0,07 Bb	0,05 Ab	0,13 Bb
	2 ^a Poda	1,32 Ba	0,75 Ba	2,07 Ba	0,28 Ba	0,35 Bab	0,64 Ba
	Poda Final	1,03 Ba	0,57 Ba	1,60 Ba	0,26 Ba	0,22 Ba	0,48 Bb
	Produção total	2,65	1,44	4,09	0,62	0,63	1,25
2 x 2	1 ^a Poda	0,62 Ab	0,16 Ab	0,78 Ab	0,14 Ab	0,08 Ab	0,22 Ab
	2 ^a Poda	3,15 Aa	1,65 Aa	4,80 Aa	0,75 Aa	0,88 Aab	1,63 Aab
	Poda Final	1,94 Aa	0,92 Aa	2,86 Aa	0,58 Aa	0,48 Ab	1,07 Ab
	Produção total	5,71	2,73	8,44	1,48	1,45	2,92

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem entre si em função dos tratamentos. Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre si em função da poda aplicada, pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

4.3. COMPOSIÇÃO MINERAL E EXTRAÇÃO DE SAIS PELAS PLANTAS

As concentrações dos elementos avaliados nas folhas e ramos das plantas foram análogas entre os espaçamentos adotados, não diferindo estatisticamente pelo teste Tukey ($P > 0,05$). Observou-se que os teores dos elementos avaliados nas folhas foram bem superiores aos dos ramos, contudo, não foram verificadas diferenças entre os dois espaçamentos adotados (Tabelas 5 e 6).

Com os teores dos elementos e a produção de matéria seca de cada parte da planta, foi possível calcular os conteúdos dos mesmos por planta e a extração total por hectare (Tabelas 5 e 6). Como as plantas no espaçamento 2 x 2 m produziram mais matéria seca do que as do espaçamento 1 x 1 m (Tabela 4), os conteúdos dos elementos por planta foram superiores para o de 2 x 2 m, como era previsível já que estas plantas tiveram menor competição.

Por outro lado, ao se avaliar a extração dos mesmos elementos por área, como no espaçamento 1 x 1 m havia maior número de plantas por hectare (10.000), a extração foi superior à observada na área com atriplex cultivada em 2 x 2 m, com apenas 2.500 plantas ha⁻¹ (Tabelas 5 e 6). A extração de sódio e cloro nas plantas mais adensadas (1 x 1 m) supera a das plantas mais espaçadas (2 x 2 m) em 170 e 167% para sódio e cloro, respectivamente, quando se considera a soma de folhas e ramos coletados nas três podas.

Tanto para conteúdo por planta quanto para extração por hectare de sódio e cloro, o que promoveu as diferenças entre os tratamentos foi a produção de biomassa, pois os teores se aproximaram (Tabela 4). Isso indica que se pode utilizar menores espaçamentos, aumentando a densidade de plantio e, portanto, incrementando a extração destes elementos contaminantes nas condições de solos afetados por sais, principal objetivo da fitorremediação. Adicionalmente, as plantas de *Atriplex nummularia* Lindl extraíram muito mais sódio e cloro (Tabela 5) do que os demais elementos analisados na matéria seca vegetal (Tabela 6), comprovando seu elevado potencial extrator de sais e sua adequabilidade para uso na fitorremediação de solos afetados por sais.

Tabela 5 – Teor, conteúdo e extração de sódio e cloro em folhas e ramos de plantas de *Atriplex nummularia* Lindl submetidas aos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m

Elemento	Espaçamento	Teor	Conteúdo	Extração	
		dag kg ⁻¹	g planta ⁻¹	kg ha ⁻¹	
Folhas					
Na ⁺	1 x 1	13,47 A	27,14 B	280,02 A	
	2 x 2	14,07 A	64,94 A	162,35 B	
	Ramos				
	1 x 1	3,00 A	5,98 B	59,44 A	
	2 x 2	3,32 A	14,49 A	36,23 A	
	Parte aérea				
	1 x 1	-	33,12 B	339,46 A	
	2 x 2	-	79,43 A	198,58 B	
Folhas					
Cl ⁻	1 x 1	13,32 A	38,58 B	334,48 A	
	2 x 2	13,83 A	78,95 A	197,37 B	
	Ramos				
	1 x 1	2,92 A	6,15 B	54,07 A	
	2 x 2	2,78 A	14,12 A	35,29 A	
	Parte aérea				
	1 x 1	-	44,73 B	388,55 A	
	2 x 2	-	93,06 A	232,66 B	

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade entre os espaçamentos.

Proporcionalmente o maior acúmulo de íons ocorreu nas folhas, representando, por exemplo, cerca de 82% da concentração total de sódio (Tabela 5). Esta acumulação ocorreu, provavelmente, por conta da presença de pequenas vesículas especiais localizadas principalmente na superfície das folhas (Azevedo et al., 2005). De acordo com Sharma (1982) essas vesículas são constituídas por células vacuoladas, com diâmetro que variam de 100 a 200 µm, ricas em sais, que

se estabelecem em elementos reguladores das concentrações eletrolíticas da folha servindo, especialmente, para a reserva dos excedentes de NaCl.

Tabela 6 – Teor, conteúdo e extração de potássio, cálcio e magnésio em folhas e ramos de plantas de *Atriplex nummularia* Lindl submetidas aos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m

Elemento	Espaçamento	Teor	Conteúdo	Extração
		dag kg ⁻¹	g planta ⁻¹	kg ha ⁻¹
K ⁺	Folhas			
	1 x 1	4,33 A	3,70 A	36,98 A
	2 x 2	3,35 A	4,76 A	11,91 A
	Ramos			
	1 x 1	0,97 A	1,09 B	10,91 A
	2 x 2	1,03 A	2,95 A	6,23 A
	Parte aérea			
	1 x 1	-	4,79 B	47,89 A
	2 x 2	-	7,71 A	18,14 A
Ca ²⁺	Folhas			
	1 x 1	3,13 A	7,90 B	79,01 A
	2 x 2	4,69 A	26,27 A	65,67 A
	Ramos			
	1 x 1	1,25 A	2,64 B	26,41 A
	2 x 2	1,50 A	9,17 A	22,92 A
	Parte aérea			
	1 x 1	-	10,54 B	105,42 A
	2 x 2	-	35,44 A	88,59 A
Mg ²⁺	Folhas			
	1 x 1	0,48 A	1,05 B	10,53 A
	2 x 2	0,55 A	2,91 A	7,26 A
	Ramos			
	1 x 1	0,09 A	0,16 B	1,62 A
	2 x 2	0,11 A	0,40 A	1,01 A
	Parte aérea			
	1 x 1	-	1,21 B	12,15 A
	2 x 2	-	3,31 A	8,27 A

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade entre os tratamentos.

Porto & Araújo (2000) reportaram que a maior acumulação de sais ocorre nas folhas, em experimento conduzido com plantas de *Atriplex nummularia* irrigadas com rejeito de dessalinização, em que o teor de cinzas das folhas correspondeu a 25,23% em relação à matéria seca, enquanto o caule fino continha 8,62%, o caule grosso 4,04% e a lenha 3,18%. A partir destes dados, a estimativa é que a acumulação de sais na planta foi correspondente a 1.145 kg ha⁻¹ ano⁻¹, para as condições de semiárido brasileiro.

Também sob condições do semiárido, Porto et al. (2001) obtiveram resultados aproximados, com retirada de 864,00 kg ha⁻¹ de sais, expressos em cinzas, pelas folhas, 120,00 e 69,00 kg ha⁻¹ retirados pelo ramo e caule, respectivamente.

Observaram-se elevados teores dos elementos avaliados nas folhas das plantas de *A. nummularia*, apresentando uma intensa acumulação de sódio e cloro, quando comparados aos teores de potássio, cálcio e magnésio, confirmando sua característica de hiperacumular sais sem o comprometimento de seu desenvolvimento fisiológico. Isso, aliado a sua alta performance no ganho de crescimento e produção de biomassa, serve como subsídio para indicar a atriplex para fitorremediação de solos afetados por sais, como também sugerido por Leal et al. (2008).

A concentração dos íons seguiu a mesma ordem nos dois tratamentos adotados (espaçamentos) e nas duas frações da planta analisadas, com os íons cloreto e sódio em maiores teores, concordando com a afirmativa de Araújo et al. (2006), que indicaram a existência de coordenação entre a acumulação de sódio e cloro, sugerindo um mecanismo de alto nível integrado entre os sistemas de captação desses dois íons. Após o sódio e o cloro, a ordem de absorção dos íons foi seguida por cálcio, potássio e magnésio (Tabelas 5 e 6).

Na fitoextração dos elementos pela planta nos espaçamentos 1 x 1 m e 2 x 2 m, verificou-se o predomínio do cloro, com uma extração de 388,55 e 232,66 kg ha⁻¹; seguido pelo sódio (339,46 e 198,58 kg ha⁻¹); cálcio (105,42 e 88,59 kg ha⁻¹); potássio (47,89 e 18,14 kg ha⁻¹) e magnésio (12,15 e 8,27 kg ha⁻¹). Esta extração seletiva de sódio e cloro é um fator positivo para seu uso em fitorremediação de solos afetados por sais do Sertão de Pernambuco, especialmente na área de realização do experimento, em que os sais que predominam nos solos e águas são de sódio e cloro (Fernandes et al., 2009).

O efeito de *A. nummularia* no acúmulo de sais também foi observado por Souza et al. (2011), sugerindo que esta halófita se configura como uma das opções para o restabelecimento das áreas afetadas por sais, uma vez que a salinização do solo se traduz como degradação ambiental no semiárido, oferecendo riscos à sustentabilidade da agricultura irrigada na região.

Carvalho Júnior et al. (2010) consideram o cultivo da atriplex como uma alternativa viável para a região Nordeste, principalmente quando sua produção estiver ligada à utilização dos rejeitos dos dessalinizadores de água salobra; e salientam que o grande desafio é desenvolver e adaptar métodos para monitorar e

avaliar o impacto do cultivo de halófitas sobre processos biológicos do solo e analisar seu uso como forragem.

Observou-se, também, que ocorreu um incremento na absorção de sódio e cloro ao longo do tempo, nas folhas e ramos da atriplex, ao mesmo tempo em que se verificou redução nos teores de potássio, cálcio e magnésio (Figura 7). O que pode ser reflexo do desequilíbrio nas concentrações desses elementos no solo, ou seja, quanto mais alta a porcentagem de sódio entre os cátions trocáveis, menor é a porcentagem dos sítios de troca ocupados pelo cálcio, magnésio e, especialmente potássio, dificultando a absorção destes. E a relação Na^+/K^+ em meios salinos é tipicamente alta (Ferreira et al., 2010).

O aumento do conteúdo de sódio e cloro, acompanhado pelo decréscimo no acúmulo de potássio, cálcio e magnésio observado nas folhas das plantas, demonstra que a *Atriplex nummularia* consegue vencer o desbalanço nutricional provocado pela salinidade, crescendo e produzindo biomassa mesmo nesta condição. Tal ocorrência foi observada por Araújo et al. (2006), em trabalho conduzido com o cultivo de *A. nummularia* com doses crescentes de NaCl, observando que o incremento da salinidade foi diretamente proporcional às concentrações de sódio e cloro e inversamente ao de potássio nas plantas.

Muitas pesquisas têm demonstrado redução nas concentrações de potássio em função da presença de outros íons salinos, e esse comportamento tem ocorrido em glicófitas e halófitas, como no milho (Azevedo Neto et al., 2004), no cajueiro (Morais et al., 2007; Rocha & Silveira, 2007), e no pinhão-manso (Silva et al., 2009).

Esta depleção é normalmente atribuída ao antagonismo existente entre o potássio e o sódio, devido à similaridade química desses dois íons, que, de maneira geral, é coordenada com a supressão da entrada de potássio e aumento do seu efluxo para a solução do solo, causada pela elevação no influxo de sódio (Silveira et al., 2003; Morais et al., 2007). No entanto, a tolerância ao sal não requer somente adaptação à toxicidade pelo sódio, mas também habilidade na aquisição de potássio (Rodríguez-Navarro, 2000).

Silva et al. (2009) afirmam que os diferentes sistemas de absorção desses dois cátions monovalentes fazem com que a planta crie uma gestão eficiente no influxo dos elementos, o que pode refletir na necessidade da planta.

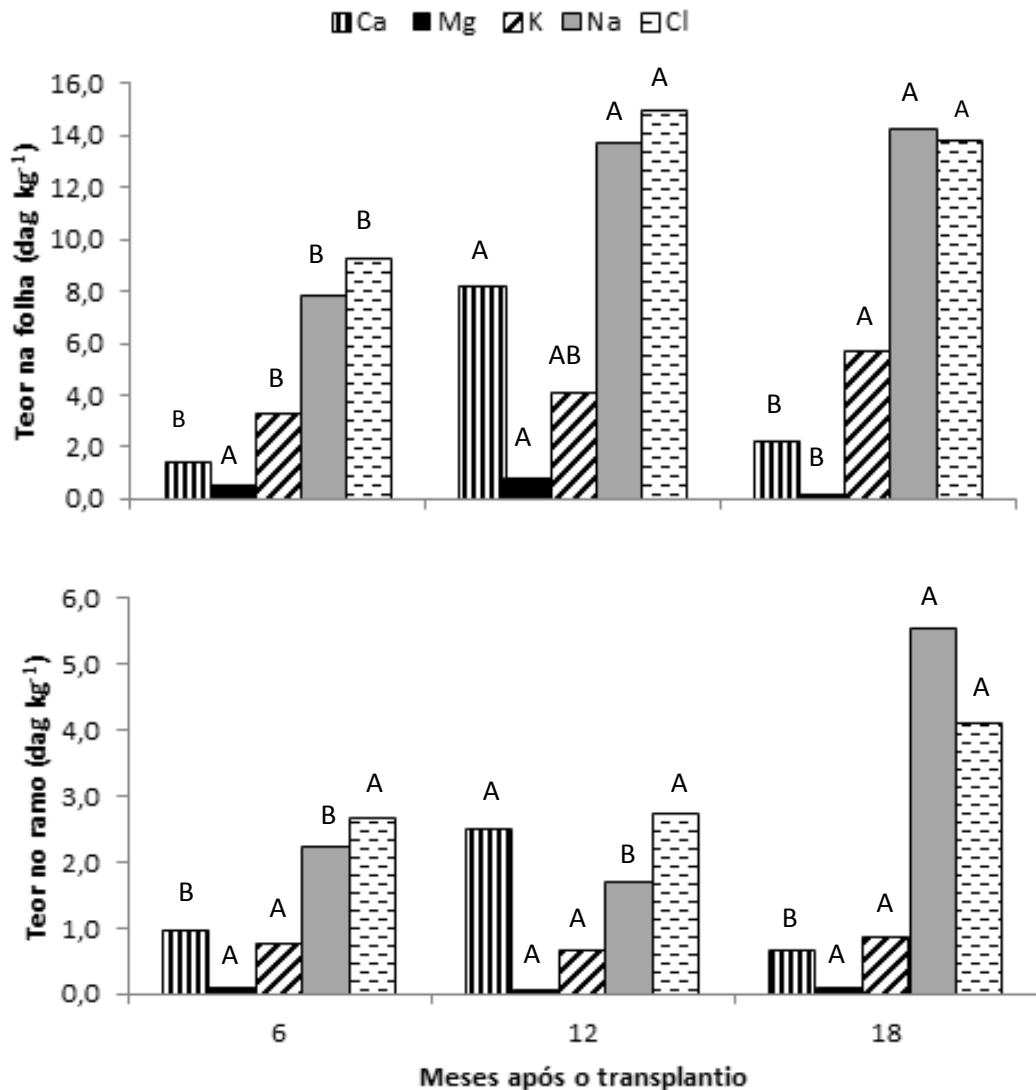


Figura 7 - Teores de sódio, cloro, potássio, cálcio e magnésio nas folhas e ramos de *Atriplex nummularia* coletados aos 6, 12 e 18 meses após o transplântio. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, entre as épocas de avaliação para cada elemento.

Blanco & Folegatti (2008) citaram um maior requerimento de potássio para o crescimento do espinafre em condições de alta salinidade que sob baixa salinidade. Citaram também um aumento do teor de sódio e diminuição do teor de potássio em folhas de soja submetidas a níveis crescentes de salinidade do solo.

Semelhantemente ao potássio, o cálcio foi outro íon cujo teor no tecido das plantas de *A. nummularia* diminuiu com o aumento da concentração de sódio, e essa diminuição pode ser atribuída ao deslocamento do cálcio, provocado pelo sódio, do plasmalema das células radiculares, o que resulta em uma perda da integridade da membrana e efluxo citossólico de solutos orgânicos e inorgânicos (Garcia et al., 2007). Isso pode ser promovido pela competição entre os íons sódio e cálcio no solo.

Variações ao longo do tempo também foram observadas nos teores de magnésio na folha, mas o teor de magnésio no ramo não apresentou variação com o tempo (Figura 7). O papel do magnésio no metabolismo vegetal tem bastante relevância, no entanto, a literatura disponível sobre estudos referentes às concentrações deste nutriente em plantas cultivadas em condições de salinidade ainda são escassos, possivelmente, por ser um elemento requerido pelas plantas em menores concentrações do que o cálcio ou o potássio.

A alta afinidade de raízes de *Atriplex nummularia* por sódio e cloro faz com que a absorção e acumulação destes íons nas folhas seja um processo muito eficaz. O sódio para a maioria das culturas não é considerado como um nutriente, no entanto, no caso da atriplex o elemento é considerado macronutriente. Por isso, esta planta é classificada como halófita obrigatória e, portanto, a presença do sódio não impede o potencial fotossintético dos tecidos, pelo contrário, este se torna essencial na realização das atividades metabólicas da planta (Araújo et al., 2006; Souza et al., 2011).

Tal fato é característico das halófitas, que têm a capacidade de acúmulo de expressivas quantidades de íons salinos dentro da célula. A *Atriplex nummularia* pode usar a absorção controlada de sódio (equilibrada por outros íons, especialmente cloro) em células para conduzir a água na planta contra baixo potencial hídrico externo e, nessas circunstâncias, a integridade da planta é mantida pelo ajustamento osmótico promovido pelo vacúolo, preservando assim a homeostase intracelular (Araújo et al., 2006).

De acordo com Azevedo et al. (2005), as espécies halófilas, possuindo uma adaptação à salinidade, são capazes de evitar a toxicidade dos íons e manter a absorção de água com altas concentrações salinas. Os dois mecanismos gerais de adaptação celular à salinidade são: o acúmulo de osmoprotetores, como glicina-betaína ou prolina, e o controle de movimentos iônicos, sendo ambos importantes no crescimento de plantas em ambientes áridos ou semiáridos.

Estes mecanismos de adaptação a ambientes sob estresse hídrico, possibilitam à atriplex o crescimento em áreas com elevadas limitações hídricas, sendo referenciada pela sua potencialidade como produtora de forragem para alimentação animal. Contudo, para uma forragem de boa qualidade, a composição da matéria vegetal em nitrogênio e proteínas é importantíssima. Os teores de nitrogênio e proteína bruta das folhas e ramos da *A. nummularia* não variaram significativamente entre as plantas cultivadas nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m

(Tabela 7). E, como era de se esperar, a proteína bruta ocorreu em maior concentração nas folhas do que nos ramos, em razão da maior concentração de nitrogênio nas folhas e por serem estas os órgãos fotossinteticamente ativos das plantas.

Tabela 7 – Valores médios dos teores de nitrogênio e proteína bruta nas plantas de *Atriplex nummularia* Lindl submetidas aos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m

Espaçamento	Teor de N — dag kg ⁻¹ —		Proteína bruta — % —	
	Parte da planta		Parte da planta	
	Folhas	Ramos	Folhas	Ramos
1 x 1	2,45 A	1,27 A	15,31 A	7,94 A
2 x 2	2,31 A	1,29 A	14,44 A	8,06 A

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade entre os espaçamentos.

O teor de proteína bruta médio das folhas variou entre 14,44 e 15,31%, enquadrando-se nos padrões da FAO (1996), que estabelece valores de proteína bruta entre 14 e 17%; confirmando que as folhas da *A. nummularia* possuem bons teores de proteína bruta. Carvalho Júnior et al. (2010) comparam os teores médios de proteína bruta encontrados em atriplex com as de algumas leguminosas e outras espécies frequentemente utilizadas na alimentação animal, como a leucena, glicíndia, quando forrageiro e a maniçoba que, em geral, normalmente apresentam entre 12 e 22% de proteína bruta. E ainda recomendam o emprego das folhas das plantas de atriplex na suplementação da alimentação animal, servindo como fonte protéica ou contribuindo para elevar a proteína bruta de dietas à base de volumosos de baixa qualidade.

Em algumas regiões do mundo a erva sal é diretamente pastejada por caprinos e ovinos como meio de sobrevivência aos impactos das secas prolongadas. No entanto, normalmente o seu fornecimento se dá principalmente na forma de feno (Porto et al., 2001). Muitos pesquisadores recomendam o seu emprego consorciado com outras forragens, salientando que a alta concentração de sais presentes nas plantas ocasiona o aumento da demanda hídrica ou podem provocar algum tipo de problema aos animais.

No contexto geral, a atriplex pode ser considerada como uma alternativa promissora para consumo animal, devido a suas características favoráveis. O seu potencial forrageiro está intimamente relacionado com seu conteúdo de proteína

bruta, aliado às altas produções de biomassa e ao elevado crescimento em condições de restrição de água e em solos salinos. O que a coloca numa posição de destaque, sobretudo nas regiões semiáridas do Nordeste brasileiro, onde a escassez de pastagem e de água, juntamente com a restrição de recursos financeiros de grande parte dos agricultores dessas áreas, faz parte da sua realidade.

4.4. ALTERAÇÃO DA SALINIDADE DO SOLO

O monitoramento da salinidade do solo durante os 18 meses de avaliação, mostrou que o balanço de sais no solo teve um comportamento muito variável ao longo do tempo, havendo oscilações nos valores de condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) a cada coleta. Souza (2010) argumenta que variações assim ocorrem em condições de campo por não se tratar de um ambiente controlado, e a ocorrência de alguns eventos na área experimental podem promover entradas e saídas de sais ao solo.

Os tratamentos tiveram efeito significativo sobre os valores de pHes nas quatro coletas de solo, entretanto, a CEes só foi alterada pelos tratamentos na quarta coleta (Tabela 8). Já a profundidade foi mais efetiva na definição de diferenças na CEes do que no pHes, possivelmente, pela presença de crostas de sais em superfície, observadas visualmente na área, e das diferentes camadas que formam este solo.

No período de fevereiro de 2010, início da fase experimental, até agosto de 2010, aos seis meses de experimento, a ocorrência de mudança na CEes foi observada com elevação dos seus valores nos tratamentos controle e aplicação de gesso, e com redução nos dois tratamentos com cultivo de atriplex (Figura 8). Já aos 12 meses, houve diminuição nos valores da CE em todos os tratamentos empregados, que pode ser atribuída à grande incidência de precipitação no período. No entanto, em nenhuma das amostragens de solo foi detectada diferença significativa de CEes entre os tratamentos (Figura 8a), possivelmente em função dos elevados valores de coeficiente de variação observados para esta variável (Tabela 8).

Tabela 8 - Níveis de significância para condutividade elétrica (CEes) e pH do extrato de saturação (pHes) considerando-se os efeitos de tratamento e profundidade a cada época de coleta

Efeito	CEes ¹	pHes ¹	CEes ²	pHes ²	CEes ³	pHes ³	CEes ⁴	pHes ⁴
Tratamento	ns	**	ns	**	ns	**	**	**
Profundidade	**	ns	**	ns	ns	ns	**	ns
Profundidade x Tratamento	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	33,23	11,43	51,58	11,83	46,10	8,33	39,39	8,61

**Significativo a 5% de probabilidade pelo teste Tukey; ns não significativo. ¹Primeira coleta; ²Segunda coleta; ³Terceira coleta; ⁴Quarta coleta.

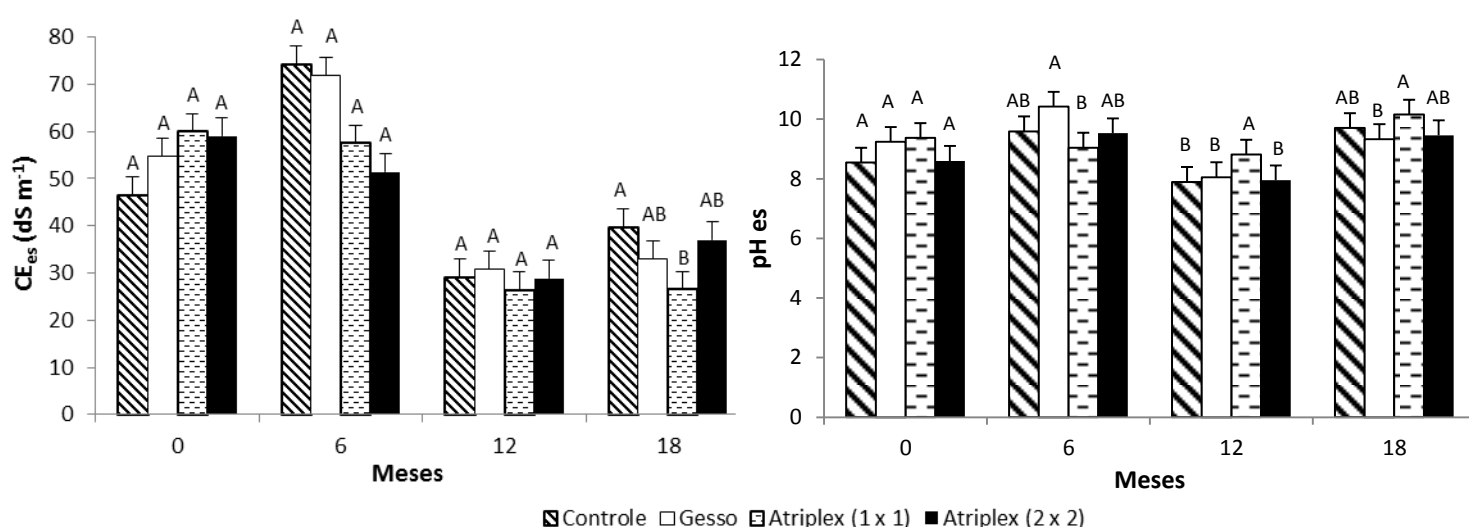


Figura 8 - Condutividade elétrica (CEes) (a) e pHes do extrato de saturação (b) do Cambissolo Flúvico aos 0; 6; 12 e 18 meses experimentais em função da aplicação de gesso e do cultivo de plantas de *A. nummularia* nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, entre os tratamentos.

Na coleta de solo aos 18 meses de implantação do experimento (agosto/2011) os valores de CEes tenderam ao aumento e a diferença significativa entre os tratamentos começaram a ser registradas (Tabela 8). O tratamento com cultivo de *Atriplex nummularia* no espaçamento 1 x 1 m resultou em CEes mais baixa, tornando-o, portanto, menos salino que o solo nos tratamentos em que esta planta não foi cultivada e no seu cultivo menos adensado (Figura 8a).

Embora, com efeito menos pronunciado, a aplicação de gesso e adoção do cultivo no espaçamento 2 x 2 m promoveram efeito significativo sobre a CEes, o que

demonstra o potencial do gesso na recuperação de solos afetados por sais. Nos tratamentos com o cultivo da atriplex, a redução da CEes nesse período, pode ser atribuída à extração de sais pelas planta nessa fase (18 MAT), com mais tempo de atuação no solo (Tabela 6). É possível que, com mais tempo de cultivo, sejam verificados resultados mais consistentes de redução na CEes do solo nos tratamentos da atriplex.

Azevedo et al. (2005), em um solo irrigado com água de rejeito de dessalinizador, com salinidade de 4 g L^{-1} e água salobra de poço, com salinidade de 3 g L^{-1} , encontraram valores inferiores de CEes quando cultivados com plantas de *A. nummularia*.

O emprego de plantas fitoextratoras de sais também foi estudado por Leal et al. (2008), que avaliaram a capacidade de recuperação de um Neossolo Flúvico sálico sódico com experimento em casa de vegetação com *A. nummularia* juntamente com aplicação de gesso e tratamentos com três águas de irrigação e mostraram que o cultivo das plantas aliado ao uso do gesso promoveu redução na CE a partir dos 100 dias de cultivo.

Já Melo et al. (2008) obtiveram redução da CE de dois solos salino-sódicos, de 22,40 e 20,20 dS m^{-1} para valores máximos de 2,18 a 3,16 dS m^{-1} com utilização de gesso como corretivo associado a aplicação de lâminas de lixiviação. E atribuíram esse efeito ao fato da aplicação do gesso ocasionar a diminuição da dupla camada difusa com a substituição do sódio trocável pelo cálcio, que floclula as argilas dispersas, melhorando a condutividade hidráulica e, em consequência, a lixiviação dos sais solúveis.

Ainda com relação à eficiência do uso de plantas em ambientes contaminados por sais, Krishnapillai & Ranjan (2005), usando *Atriplex patula* durante 150 dias de cultivo, confirmaram o potencial remediador do gênero atriplex, com a redução da condutividade elétrica do extrato de saturação de 145 dS m^{-1} para 48 dS m^{-1} .

As mesmas variações ao longo do tempo foram observadas nos valores de pH do extrato de saturação, com tendência ao aumento nos seis e dezoito meses experimentais e redução aos doze meses, com efeito significativo a partir do sexto mês de avaliação (Tabela 8). No entanto, as diferenças entre os tratamentos foram oscilantes até o final do experimento, quando o tratamento com cultivo de atriplex no espaçamento 1 x 1 m teve valor mais elevado de pHes (9,98) e o correspondente à aplicação de gesso foi mais efetivo na redução do pHes (9,15) em relação às condições originais do solo, em comparação com os outros tratamentos (Figura 8b).

Este fato contraria a afirmação de Qadir et al. (2007), que atribuem como mais eficiente o mecanismo que as plantas têm em liberar através do sistema radicular H^+ e CO_2 ao solo, provocando a dissolução da calcita e aumentando assim o teor de cálcio no solo, com conseqüente redução do pH.

No entanto, efeito contrário foi observado no experimento, havendo tendência de aumento no pH em função dos tratamentos aplicados com plantas de atriplex e esse comportamento deve-se ao provável processo de hidrólise do Ca^{2+} e Mg^{2+} que gera OH^- , tal processo promove uma reação com o bicarbonato que resulta no aumento do carbonato na solução do solo. E a presença desses ânions no meio promove uma subsequente elevação do pH (Qadir et al., 2007).

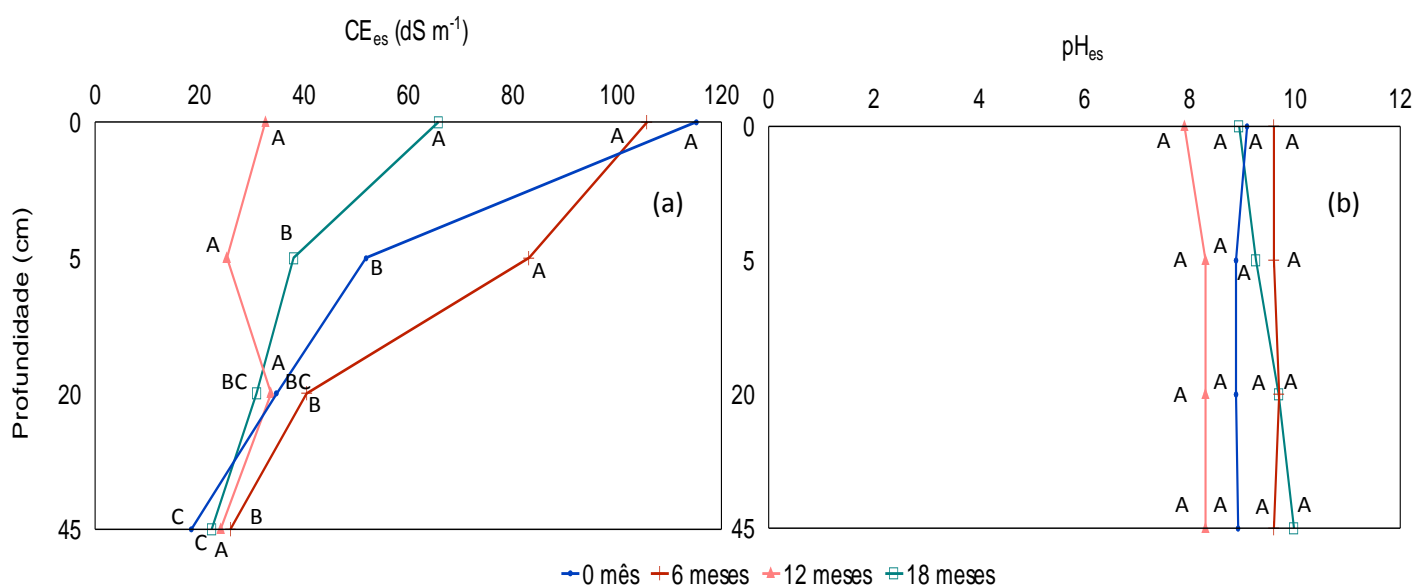


Figura 9 – Condutividade elétrica (a) e pH do extrato de saturação (b) aos 0; 6; 12 e 18 meses experimentais na crosta superficial (0-2 mm) e nas profundidades de 0-10; 10-30 e 30-60 cm. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade, entre as profundidades.

O melhor desempenho do tratamento com aplicação de gesso em relação aos valores de pH_{es}, de acordo com Ruiz et al. (2004), pode ser explicado pela substituição do sódio adsorvido pelo cálcio do corretivo, além da precipitação dos carbonatos de sódio existentes. Os mesmos autores ainda salientam que a aplicação de gesso em solos sódicos tem a finalidade de transformar em sulfatos parte dos carbonatos de sódio do solo e deslocar o sódio adsorvido ao complexo de troca. Desta forma, não havendo carbonato de sódio no solo nem sódio adsorvido para sofrer hidrólise, o pH é reduzido. Para a efetiva atuação do gesso é preciso que

haja água no sistema para sua solubilização, o que foi verificado com a elevada precipitação que houve no ano de condução do experimento (APAC, 2011), no entanto, em anos mais secos seria necessário a aplicação de água via irrigação, o que aumentaria os custos da correção química com gesso.

Ao se avaliar as mudanças na CEes e pHes em função da profundidade do solo, verifica-se que a CEes diminuiu em camadas mais profundas (Figura 9a), mas o pHes foi pouco alterado, não havendo variação significativa ($P > 0,05$) entre as profundidades em nenhuma das épocas do experimento (Figura 9b). Observou-se, também, os altos valores de pH neste solo nas quatro avaliações, variando entre pH 8 e 10, muito elevados para o desenvolvimento da maioria das plantas, mas que a atriplex consegue suportar.

Os maiores valores de CEes, nas quatro amostragens de solo, foram verificados nas camadas mais superficiais, especialmente na crosta e com significativa redução nos horizontes subsuperficiais (Figura 9a). Essa tendência foi verificada na montagem do experimento (tempo zero) e aos 6 e 18 MAT, no entanto, no 12 MAT não houve diferença significativa entre as profundidades.

Esses mais altos níveis de salinidade na camada superior (crosta), chegando a valores médios de 115,18, 105,79 e 65,79 dS m^{-1} , nos 0, 6 e 18 meses de condução do experimento, respectivamente, evidenciam a elevada concentração dos sais em superfície, resultante da ascensão capilar de água do lençol freático, característica de regiões com altas taxas de evapotranspiração e baixos índices de precipitação pluvial.

Na ascensão capilar, a água e os materiais nela dissolvidos, tendem a se translocar até as camadas superiores, onde é perdida por evaporação, deixando os sais da solução depositados em superfície. Além disso, este processo tem a contribuição do manejo inadequado da irrigação, com o fornecimento de água de má qualidade, de forma excessiva sem contemplar a capacidade de infiltração no solo e sem a presença de uma drenagem eficiente.

O incremento da concentração dos sais nas camadas mais profundas do solo é relatado na literatura e associado a diversas causas. No trabalho de Krishnapillai & Ranjan (2005) foi observado aumento da CEes com a profundidade e os autores atribuíram esse comportamento à percolação dos sais ao longo do perfil. Já no experimento conduzido em solo salino por Ravindram et al. (2007), a redução na CEes verificada nos primeiros 40 cm de profundidade, foi resultante do cultivo de duas espécies halófitas, que promoveram a extração dos sais nessa camada.

No presente trabalho, com a redução dos níveis de salinidade após a implantação do experimento ao longo do período de avaliação, foi observada a presença da vegetação de espécies nativas, sobretudo nas parcelas onde foram cultivadas as plantas de atriplex. A presença da erva-sal proporcionou condições mais adequadas às outras plantas, promovendo cobertura e proteção ao solo, mantendo a sua umidade e reduzindo a temperatura do mesmo. Nesse contexto, pode-se dizer que a implantação de culturas tolerantes aos sais, como a *A. nummularia*, oferece um sistema mais sustentável em solos de semiárido degradados pela salinidade.

Quanto às épocas de amostragem, aos 12 MAT a salinidade foi reduzida similarmente nas camadas avaliadas, com CEes igual a 32,63 (crosta), 25,27 (0 – 10 cm), 33,72 (10 – 30 cm) e 24,04 dS m⁻¹ (30 – 60 cm), sem diferença significativa entre as profundidades. Isto se deve a uma provável ocorrência de lixiviação dos sais com o incremento da umidade do solo, resultante da elevada precipitação observada no período de janeiro e fevereiro de 2011 (Figura 10), 115,8 e 151%, respectivamente acima da média destes meses na região (APAC, 2011).

Ao se avaliar os valores médios de CEes em todos os tratamentos e profundidades de cada amostragem de solo confirma-se que a precipitação influenciou diretamente nos valores de CEes observados (Figura 10). Mas, sabendo-se que estes eventos de elevada precipitação são fenômenos que não se repetem com frequência, e verificando-se que a salinidade foi aumentada na última amostragem (agosto/2011) em virtude de mais um período de baixa precipitação, justifica-se mais ainda a necessidade de manutenção das plantas em campo por períodos longos para que a diminuição dos teores de sais seja realmente efetiva.

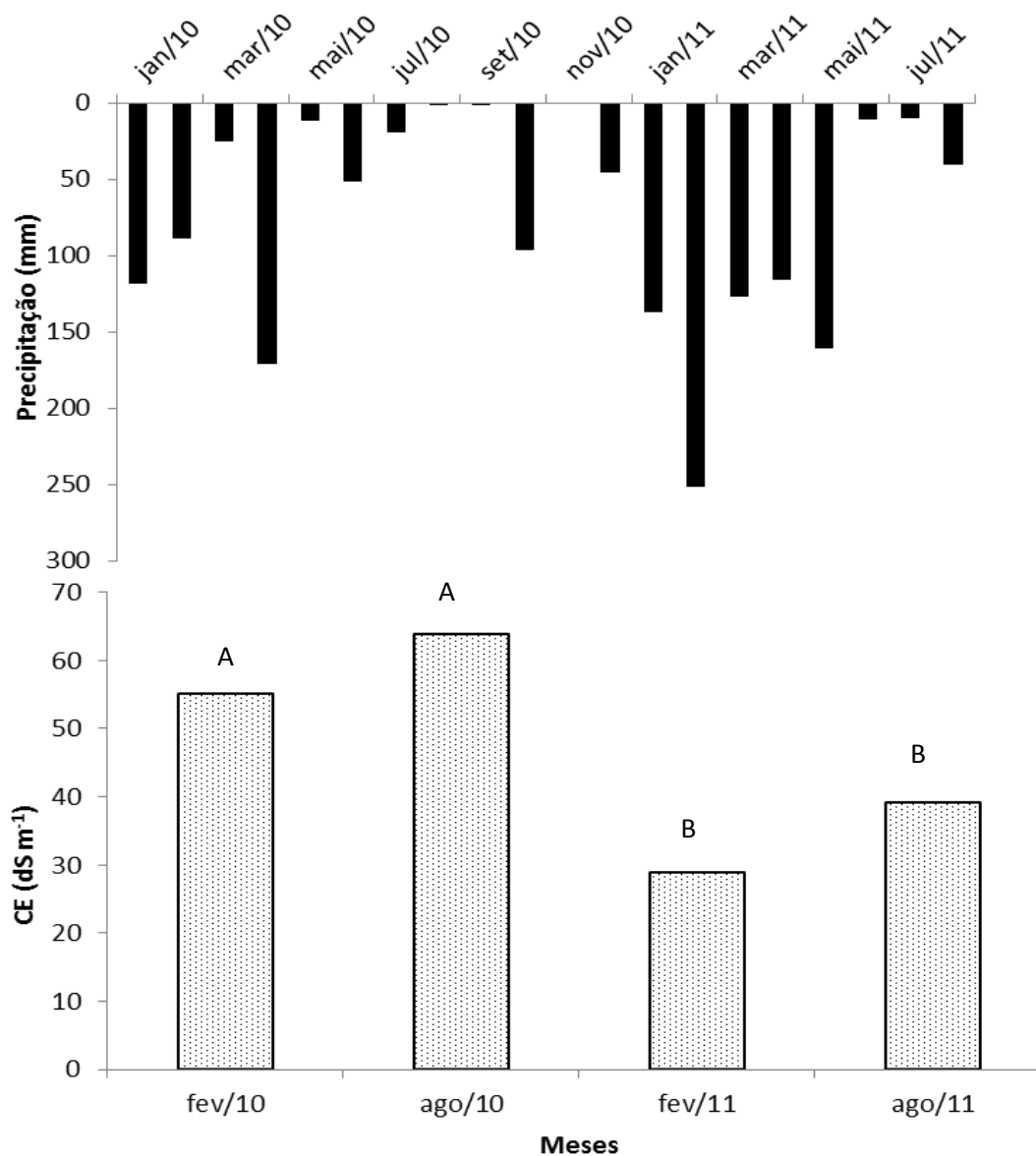


Figura 10 – Valores de condutividade elétrica do extrato de saturação (CEEs) e médias de precipitação mensal registradas nas proximidades da área experimental durante o experimento. (IPA, 2011). Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, entre as épocas de avaliação.

4.5. DINÂMICA DOS ÍONS NO SOLO

Além da CEEs, que indica o total de sais no solo, é importante conhecer a concentração dos diversos íons envolvidos em ambiente salino, bem como suas relações, já que o efeito prejudicial de alguns íons sobre o solo e as plantas é mais intenso que de outros. O fator clima, juntamente com as características do solo, seu manejo e atividade das plantas forneceram subsídios conclusivos para a dinâmica dos íons no meio.

Queiroz et al. (2010) afirmam que em solos salinos as propriedades químicas e físicas tem uma grande variabilidade espacial e temporal natural, devido a influências das práticas de manejo utilizadas, profundidade do lençol freático, permeabilidade do solo, taxa de evapotranspiração, chuvas, salinidade da água subterrânea e outros fatores geohidrológicos. Em adição a esse comentário, Santos et al. (2010) também destacam a elevada heterogeneidade química dos solos salinizados.

Essas variações foram observadas ao longo do estudo, com oscilações nos valores das variáveis estudadas nas épocas de avaliação (Tabelas 9, 10 e 11). De modo geral, os valores dos íons trocáveis e solúveis assumiram uma mesma tendência de redução na área no período de fevereiro de 2011, exceto para os teores de sódio trocável no tratamento controle, onde a concentração foi crescente (Tabela 9). A incidência de chuvas regulares durante os períodos chuvosos, nessa época, quando o padrão no clima foi antagônico ao observado no local, pode ter causado a redução nos teores dos íons, devido ao efeito de diluição na solução do solo.

Adicionalmente, a supressão dos teores nessa amostragem, provavelmente, também se deve à lixiviação dos sais, em decorrência do total de chuva precipitada, enfatizando a ação da chuva na lavagem dos sais dos solos. Acordando com os resultados de Lopes et al. (2008), os quais alegam ser a lixiviação no perfil do solo maior quando uma dada lâmina, que ocorreria em um longo período de tempo, concentra-se em um curto espaço de tempo.

Paralelamente, a ação física das raízes nos tratamentos com cultivo, contribuiu para o aumento da condutividade hidráulica do solo e, assim, a lixiviação foi estimulada. Este processo, aliado à absorção dos íons pelas plantas de *A. nummularia*, provavelmente foram determinantes para a redução de alguns elementos nos tratamentos referentes ao cultivo dessa planta durante o período de estudo.

Observou-se o predomínio dos íons Na^+ no complexo de troca em relação a Ca^{2+} , K^+ e Mg^{2+} trocáveis (Tabela 9), íons estes em equilíbrio com a fração que permanece na solução (íons solúveis). Com a elevação da salinidade do solo, os cátions anteriormente adsorvidos podem ser substituídos, por ação de massa, por outros cátions com maior atividade na solução do solo, como neste caso específico, o Na^+ .

Tabela 9 – Teores de Na⁺, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis e capacidade de troca de cátions (CTC) no solo nos tratamentos controle, uso de gesso e cultivo de *Atriplex nummularia* Lindl nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m aos 0, 6, 12 e 18 MAT

Tratamento	Tempo (meses)			
	0	6	12	18
Na⁺ (cmol_c kg⁻¹)				
Controle	3,83 A	3,85 A	5,11 A	7,30 A
Gesso	4,78 A	4,53 A	4,03 A	4,00 AB
Atriplex (1 x 1)	5,95 A	2,98 A	2,97 B	3,12 B
Atriplex (2 x 2)	4,61 A	2,90 A	2,20 B	3,23 B
CV (%)	44,69	58,33	52,59	52,90
K⁺ (cmol_c kg⁻¹)				
Controle	0,26 A	0,17 A	0,12 A	0,53 A
Gesso	0,28 A	0,15 A	0,11 A	0,21 A
Atriplex (1 x 1)	0,37 A	0,14 A	0,23 A	0,44 A
Atriplex (2 x 2)	0,32 A	0,14 A	0,20 A	0,24 A
CV (%)	31,00	105,18	73,44	228,86
Ca²⁺ (cmol_c kg⁻¹)				
Controle	2,02 A	1,21 B	1,12 B	1,64 B
Gesso	2,25 A	1,81 AB	1,87 A	3,08 A
Atriplex (1 x 1)	2,07 A	1,52 AB	0,96 B	2,41 AB
Atriplex (2 x 2)	2,24 A	2,35 A	1,08 B	2,35 AB
CV (%)	25,74	54,29	41,99	64,96
Mg²⁺ (cmol_c kg⁻¹)				
Controle	0,61 A	0,55 A	0,23 A	0,93 A
Gesso	0,62 A	0,47 A	0,46 A	1,26 A
Atriplex (1 x 1)	0,50 A	0,57 A	0,20 A	1,17 A
Atriplex (2 x 2)	0,60 A	0,56 A	0,22 A	1,23 A
CV (%)	24,94	33,28	127,75	56,08
CTC (cmol_c kg⁻¹)				
Controle	10,96 A			
Gesso	13,97 A			
Atriplex (1 x 1)	13,16 A			
Atriplex (2 x 2)	10,91 A			
CV (%)	37,92			

Médias seguidas de letras iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, entre os tratamentos. CV – coeficiente de variação.

Os tratamentos com aplicação de gesso e cultivo da atriplex foram mais efetivos na redução do teor de Na⁺ no solo, diferindo da testemunha ao final do experimento (Tabela 9). No final do estudo, a média de redução em relação aos teores originais foi de 16,31% para o tratamento com gesso, 47,96% e 29,93%, respectivamente, para os tratamentos com cultivo de atriplex nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m. Contrariamente, no tratamento controle foi observado um aumento do teor de Na⁺ ao longo do tempo, com um incremento de 90,3% em relação aos valores encontrados no solo no período de implantação do estudo.

A efetividade da aplicação de gesso pode ser devido à substituição do Na⁺ trocável pelo Ca²⁺ fornecido pelo corretivo, e essa eficiência tem sido largamente

relatada na literatura, como nos trabalhos de Holanda et al. (1998); Barros et al. (2004), Vital et al. (2005); Leite et al. (2007); Melo et al. (2008); Barros et al. (2009); Leite et al. (2010) e Miranda et al. (2011).

Comparativamente ao emprego do corretivo químico, as reduções percentuais nos teores de Na⁺ trocável foram mais significativas nos tratamentos com atriplex, diferindo estatisticamente (P < 0,05). Leal et al. (2008), trabalhando com solo de características bem semelhantes, também obtiveram resultados que demonstram a capacidade das plantas de *A. nummularia* em promover o decréscimo no teor de Na⁺ no complexo de troca do solo.

Tabela 10 - Teores de Na⁺, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ solúveis no solo nos tratamentos controle, uso de gesso e cultivo de *Atriplex nummularia* nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m aos 0, 6, 12 e 18 MAT

Tratamento	Tempo (meses)			
	0	6	12	18
Na⁺ (mmol_c L⁻¹)				
Controle	1014,96 A	999,27 A	448,69 A	435,62 A
Gesso	1013,43 A	1089,18 A	374,09 A	389,69 AB
Atriplex (1 x 1)	1107,37 A	781,87 A	267,44 A	155,38 C
Atriplex (2 x 2)	1096,44 A	784,89 A	377,13 A	290,30 B
CV (%)	60,54	89,70	70,00	88,60
K⁺ (mmol_c L⁻¹)				
Controle	3,35 A	2,52 A	0,91 A	2,74 A
Gesso	3,70 A	2,30 A	1,44 A	1,44 A
Atriplex (1 x 1)	4,22 A	2,80 A	0,87 A	1,64 A
Atriplex (2 x 2)	3,93 A	2,25 A	0,93 A	2,05 A
CV (%)	75,69	82,86	115,99	105,03
Ca²⁺ (mmol_c L⁻¹)				
Controle	34,59 A	49,10 AB	32,69 A	152,59 B
Gesso	35,80 A	30,05 AB	32,23 A	222,44 A
Atriplex (1 x 1)	29,22 A	21,76 B	17,75 A	140,54 B
Atriplex (2 x 2)	35,97 A	65,36 A	26,66 A	152,30 B
CV (%)	58,57	103,57	85,69	46,11
Mg²⁺ (mmol_c L⁻¹)				
Controle	10,12 A	15,07 A	5,08 A	65,10 A
Gesso	9,57 A	9,75 A	4,35 A	51,83 A
Atriplex (1 x 1)	11,63 A	8,83 A	3,94 A	36,83 A
Atriplex (2 x 2)	12,80 A	10,84 A	4,63 A	47,66 A
CV (%)	107,64	87,89	88,13	70,41

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, entre os tratamentos. CV – coeficiente de variação.

A mesma tendência foi observada em relação à concentração de Na⁺ solúvel, com diferença entre os tratamentos nos teores deste elemento aos 18 MAT (Tabela 10). Essa variação entre os tratamentos não ocorreu com o Cl⁻, possivelmente, pelos

elevados valores de coeficiente de variação verificados para esta variável (Tabela 11).

Tabela 11 - Teores de Cl^- , CO_3^{2-} e HCO_3^- na solução do solo nos tratamentos controle, uso de gesso e cultivo de *Atriplex nummularia* nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m aos 0, 6, 12 e 18 MAT.

Tratamento	Tempo (meses)			
	0	6	12	18
Cl^- (mmol_c L⁻¹)				
Controle	1015,90 A	830,20 A	367,9 A	504,45 A
Gesso	876,50 A	975,80 A	454,6 A	467,75 A
Atriplex (1 x 1)	1040,86 A	727,00 A	281,3 A	462,91 A
Atriplex (2 x 2)	1012,41 A	718,40 A	350,4 A	356,59 A
CV (%)	56,97	90,52	70,14	136,54
CO_3^{2-} (mmol_c L⁻¹)				
Controle	0,36 A	0,37 AB	0,37 A	3,06 A
Gesso	0,34 A	0,18 B	0,18 A	3,09 A
Atriplex (1 x 1)	0,36 A	1,69 A	1,69 A	3,94 A
Atriplex (2 x 2)	1,54 A	0,18 B	0,18 A	1,34 A
CV (%)	253,18	247,74	247,56	122,67
HCO_3^- (mmol_c L⁻¹)				
Controle	2,31 A	3,37 B	5,38 A	7,06 A
Gesso	2,57 A	3,69 AB	6,69 A	8,67 A
Atriplex (1 x 1)	3,01 A	5,96 A	9,96 A	7,72 A
Atriplex (2 x 2)	3,26 A	5,12 A	5,13 A	7,84 A
CV (%)	59,15	251,29	63,56	52,58

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, entre os tratamentos. CV – coeficiente de variação.

O Na^+ trocável diminuiu ao longo do experimento, especialmente nos tratamentos com cultivo de atriplex, confirmando a absorção desse íon pelas plantas de *A. nummularia* que, como halófitas obrigatórias, absorvem grandes quantidades de sódio, o que pode ser comprovado pelos teores do mesmo no tecido vegetal das plantas no presente estudo (Tabela 6).

A presença de plantas também fornece outras consequências ao fluxo de sódio no solo, pelo estímulo à atividade biológica na zona radicular, que eleva a concentração de CO_2 e a taxa de dissolução de carbonatos, a um nível suficiente para a remoção de parte do Na^+ trocável, deixando-o livre na solução para que seja lixiviado, corrigindo o solo (Carmona et al., 2010).

Observou-se, também, que na última amostragem de solo, os teores de Ca^{2+} foram bastante elevados (Tabela 10), provavelmente, pela dissolução de minerais liberando este cátion, em função da elevada precipitação verificada no período anterior aos 18 MAT (Figura 11).

Os teores de Cl^- solúvel parecem ter diminuído com o uso do gesso e o plantio de atriplex nos dois espaçamentos, entretanto, ainda não foram detectadas diferenças significativas, provavelmente pelos valores muito altos de coeficiente de variação desta variável (Tabela 11). Esse comportamento de diminuição nos teores de Na^+ e Cl^- ratifica a afinidade da *A. nummularia* por estes íons, destacando o seu potencial na recuperação de áreas sob influência de sais.

As concentrações dos cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} se deram, provavelmente, em resposta ao antagonismo com o Na^+ do solo, que, ao longo do tempo, estas concentrações foram afetadas significativamente pelos tratamentos (Tabela 9). Foi observada uma diminuição desse efeito à medida que os teores de Ca^{2+} elevaram-se, pois a maior participação do mesmo no complexo de troca do solo tende a reagir com o Na^+ , substituindo-o.

Dentre os cátions trocáveis, pela sua valência e maior raio iônico hidratado, o Na^+ situa-se no último lugar quanto à seletividade de adsorção (série liotrópica), o que em si é um fator favorável a sua substituição, pois, em condições de igualdade de concentração, é o último dos cátions comuns a ser adsorvido às cargas elétricas, após o preenchimento por $\text{H}^+ \gg \text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+$ (Holanda et al., 1998).

Houve maior contribuição do tratamento com aplicação de gesso nos teores de Ca^{2+} solúvel e trocável, demonstrando que, embora o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) apresente baixa solubilidade, próximo de 2 g L^{-1} (Leite et al., 2010), a disponibilização de Ca^{2+} , proporcionada pelo gesso solubilizado em função das chuvas, resultaram em aumento do conteúdo deste elemento, tanto na solução (Tabela 10) como no complexo de troca do solo (Tabela 9). No caso do Mg^{2+} , os aumentos observados aos 18 MAT podem estar associados à solubilização de minerais após a incidência das chuvas no período que antecedeu esta amostragem.

Com relação aos tratamentos com planta, o aumento dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} pode ser explicado pela sugestão de Qadir et al. (2007), argumentando que, entre os vários processos químicos da fitorremediação de solos sódicos e, ou salinos, está a capacidade das plantas em liberar cálcio e magnésio de minerais presentes no solo como a calcita, por meio acidificação do solo próximo ao sistema radicular das plantas.

De modo geral, um incremento na concentração de Ca^{2+} e Mg^{2+} na solução do solo no último mês de avaliação foi observado em todos os tratamentos adotados, e esse aumento também pode ser atribuído à elevação e à qualidade da

água do lençol freático, funcionando como fonte alternativa desses elementos. A área experimental está localizada nas cotas mais baixas do Perímetro Irrigado Cachoeira II, com o lençol freático próximo à superfície; e o movimento ascendente de água no perfil do solo pode ter promovido as oscilações dos teores desses elementos na área (Figura 11).

Garcia et al. (2008) também relataram aumento na concentração desses macronutrientes no solo, e relacionaram o evento, dentre outras causas, à ascensão de água com sais do lençol freático. Aguiar Netto et al. (2007), trabalhando com Neossolo no Perímetro Irrigado Califórnia, SE, relatam que quando águas freáticas se aproximam da superfície do solo a evapotranspiração provoca a concentração de CO_3^{2-} de Ca^{2+} e Mg^{2+} no perfil. De fato, as maiores concentrações de CO_3^{2-} e HCO_3^- no solo foram observadas nesse período, e esse comportamento pode ter sido determinado pela movimentação das águas subterrâneas no perfil do solo.

Os baixos teores do K^+ no complexo de troca (Tabela 9) e na solução do solo (Tabela 9) são resultantes do referido equilíbrio entre cátions do solo, relacionados com os teores de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , que predominam no sistema. Holanda et al. (1998), estudando os efeitos do uso de condicionadores nas propriedades químicas do solo indicaram a existência de um desbalanço natural nas relações K:Ca:Mg trocáveis no solo, que se acentua com a gessagem, salientando a necessidade de correção potássica para que se atinja o equilíbrio em proporções mais adequadas para a maioria das culturas, situando a relação entre 1:9:3 e 1:25:5. Os mesmos autores destacam que o desequilíbrio nas relações desses cátions é admitido como o problema mais importante para o estabelecimento de culturas, superando a própria saturação com sódio. Santos et al. (2005) afirmam que, de modo geral, a concentração de K^+ tende a ser menor com o aumento da relação Na:Ca na solução do solo.

A menor participação deste elemento na fase solúvel observada nos tratamentos com a atriplex em relação ao tratamento controle, muito provavelmente é decorrente da absorção deste macronutriente pelas plantas. Como já discutido anteriormente, o potássio desempenha importante função, sendo essencial na ativação enzimática; e em algumas halófitas como a *A. nummularia*, a sua concentração a nível citosólico é de extrema importância para manter uma relação $\text{K}^+:\text{Na}^+$ adequada, de forma a garantir a integridade do ciclo vegetativo desses organismos.

A variação em profundidade do Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis evidencia o aumento dos teores de Na^+ em camadas mais profundas do perfil, em todos os períodos de avaliação, o que não foi observado para os outros cátions avaliados (Figura 11). Este incremento de Na^+ acompanha o aumento dos teores de argila em profundidade que, por sua vez, deve estar associado à migração de coloides ao longo do perfil em função da dispersão do sistema saturado por Na^+ (Freire et al., 2003).

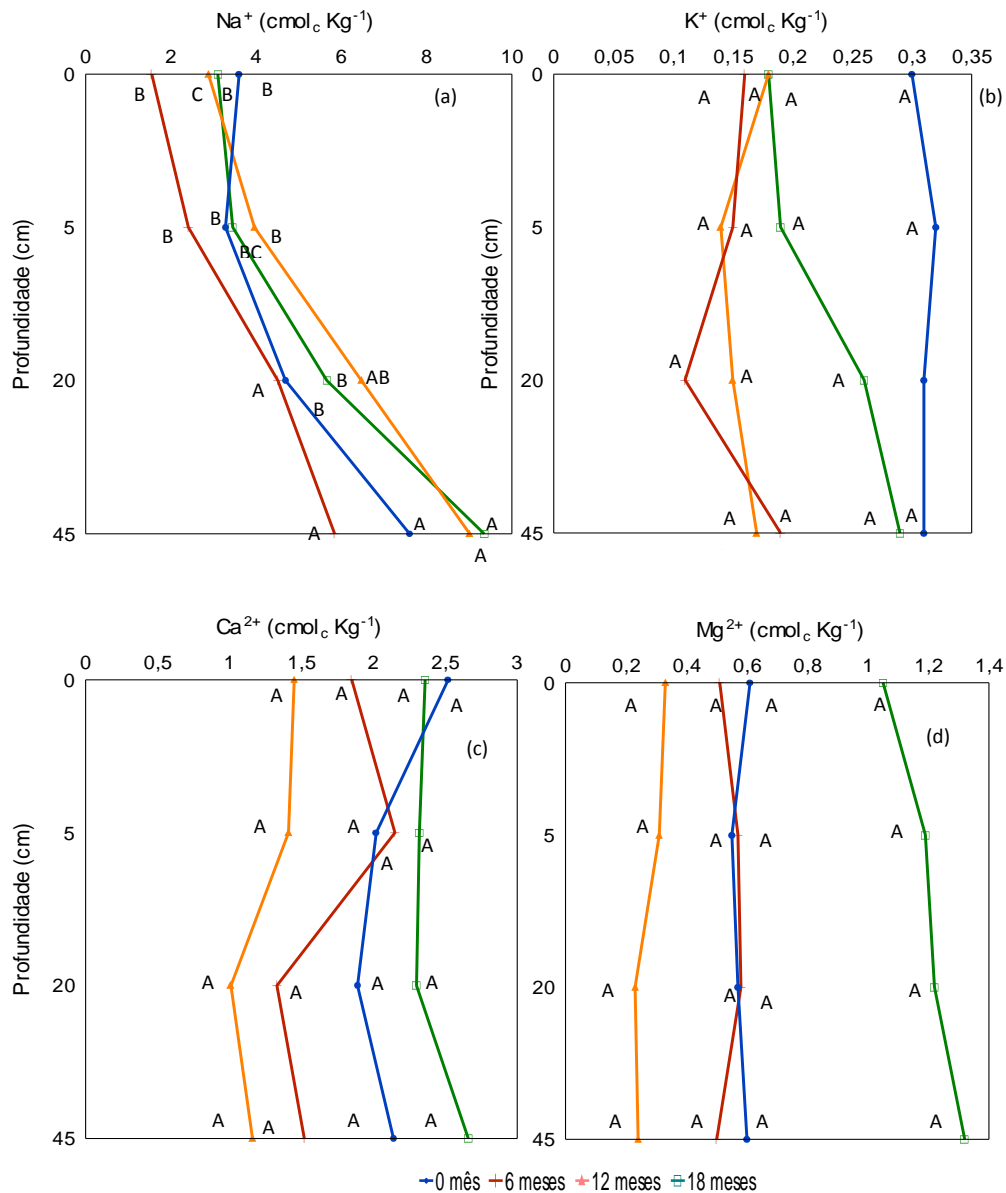


Figura 11 – Teores dos cátions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) no complexo de troca do solo aos 0, 6, 12 e 18 MAT na crosta superficial (0-2 mm) e nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade entre as camadas de solo.

Contrariamente, a distribuição uniforme em profundidade dos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ (Figura 12 b, c e d) deve-se, provavelmente, aos menores níveis destes íons no solo, pela competição decorrente da presença dominante do Na^+ no complexo sortivo.

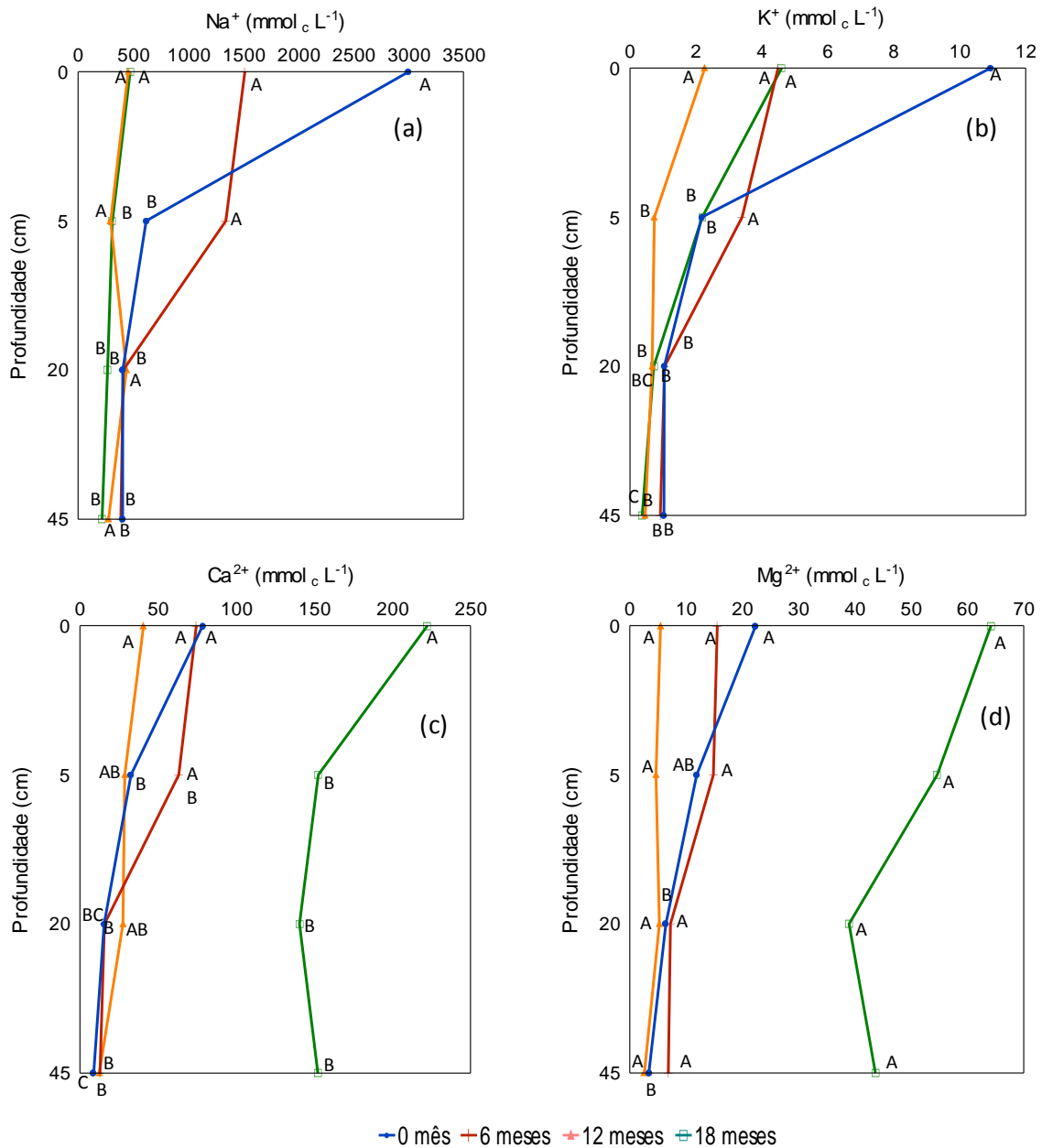


Figura 12 – Teores dos cátions Na^+ (a), K^+ (b), Ca^{2+} (c) e Mg^{2+} (d) solúveis aos 0, 6, 12 e 18 MAT na crosta superficial (0-2 mm) e nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, entre as camadas de solo.

Ao se avaliar as concentrações médias dos íons solúveis (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} e HCO_3^-) ao longo do perfil do solo, foram registradas diferenças entre os

horizontes, com maiores concentrações destes íons na camada superficial do solo (crosta), em decorrência do processo evaporativo da água, deixando sais precipitados em superfície (Figuras 12 e 13).

Esta é uma característica natural de solos salinos, que apresentam uma crosta salina na superfície, promovida pela presença de sais em excesso nesta fina camada de solo. Crosta essa que representa impedimento à infiltração de água no solo, aumentando o transporte da água em superfície e, com esta, dos sedimentos que desencadeiam os processos erosivos no solo.

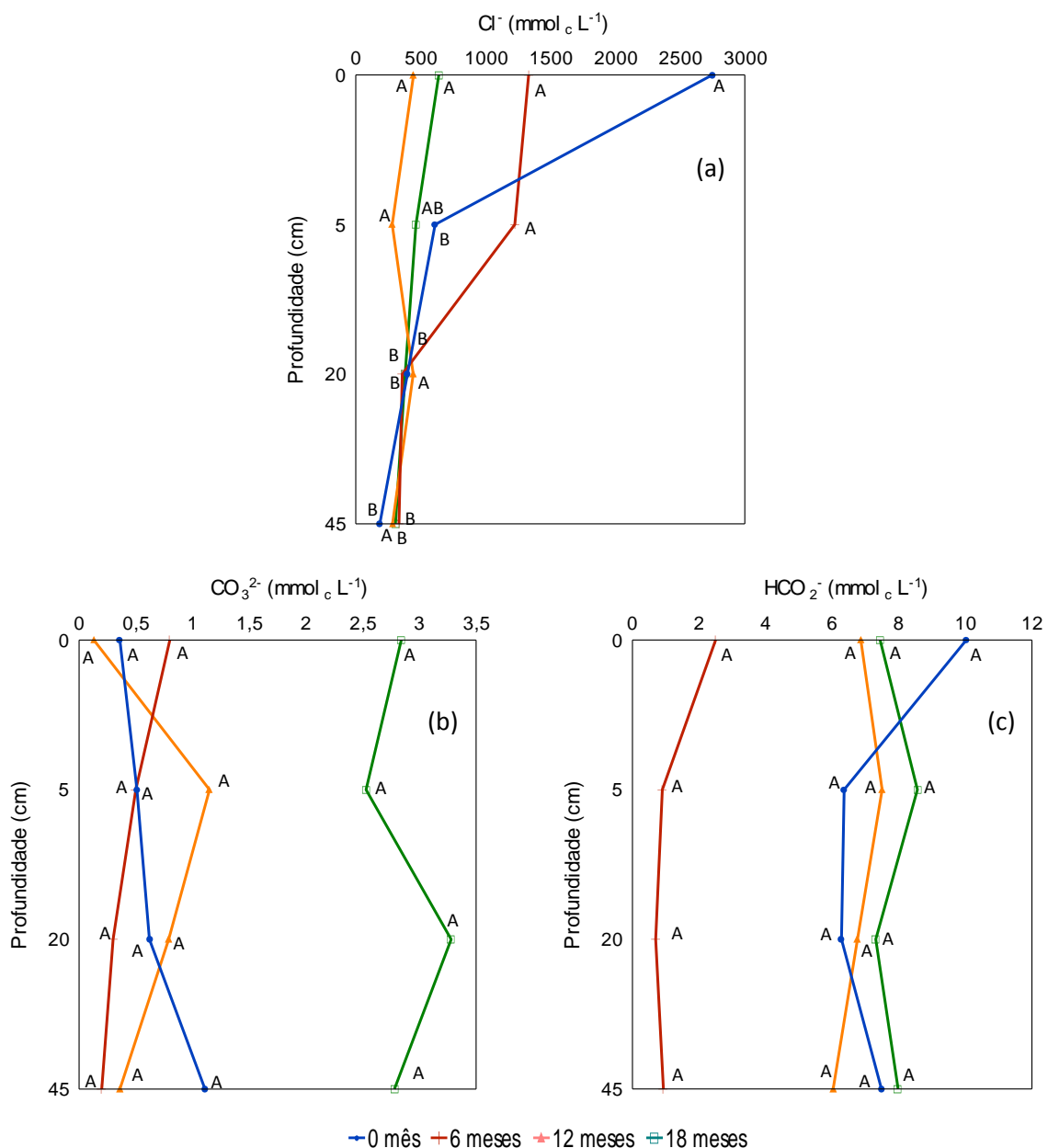


Figura 13 – Teores dos ânions Cl^- (a), CO_3^{2-} (b) e HCO_3^- (c) solúveis do solo aos 0, 6, 12 e 18 MAT na crosta superficial (0-2 mm) e nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, entre as camadas de solo.

Tal comportamento está em consonância com a afirmação de Santos et al. (2010), que relatam que a heterogeneidade dos atributos químicos dos solos salinizados é uma realidade. Tanto nos salinos, como nos salino-sódicos ou sódicos observa-se que não há uma continuidade nesses atributos, o que está fortemente ligado à ocorrência de manchas esbranquiçadas ou escuras na superfície desses solos, as crostas de sais.

Além disso, este comportamento também evidencia o antecedente manejo inadequado da irrigação no perímetro que, provavelmente, promoveu o acúmulo de sais na profundidade efetiva do sistema radicular das plantas.

Os menores teores de íons solúveis foram verificados no solo coletado aos 12 meses de implantação do experimento, período posterior à maior incidência de chuvas e lixiviação natural de parte dos sais da superfície (Figuras 12 e 13).

Destaca-se, também, a diminuição das concentrações de Na^+ e Cl^- , especialmente na crosta superficial, amenizando os efeitos nocivos citados anteriormente, bem como o aumento dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} aos 18 MAT, provavelmente, em função da melhoria das condições do solo.

Andrade et al. (2004) observaram que durante a estação chuvosa, o íon Na^+ esteve presente em concentrações maiores na camada superficial, dada a elevada solubilidade deste íon e pelas altas taxas de evapotranspiração registradas nas regiões semiáridas, com um conseqüente acúmulo de sais na superfície do solo.

No entanto, os teores de CO_3^{2-} e HCO_3^- não diferiram significativamente entre as camadas ($P > 0,05$) em nenhuma das épocas de avaliação (Figura 13 b e c), o que pode ser atribuído às baixas concentrações destes ânions, quando comparados ao Cl^- .

Este comportamento dinâmico dos elementos, muitas vezes com discrepância espacial e temporal é bem característico dos solos salinos, o que foi decisivo nos altos valores dos coeficientes de variação das variáveis estudadas. A análise e o entendimento dessa dinâmica tornam-se importantes, pois os mesmos relacionam-se e determinam critérios e limites de caracterização dos solos afetados por sais e, ou sódio, influenciando a eficiência do manejo agrícola dos mesmos.

4.6. ALTERAÇÃO DA SODICIDADE DO SOLO

Na avaliação da sodicidade do solo, por meio das variáveis percentagem de sódio trocável (PST) e relação de adsorção de sódio (RAS), observou-se que, tanto

a aplicação de gesso como a fitorremediação nos dois espaçamentos entre plantas, foram eficazes para a redução da PST (Figura 14).

No tratamento com uso de gesso, antes da correção o solo apresentava uma percentagem de sódio trocável de 41,77% e aos 18 MAT passou ao valor médio de 28,63%, o que corresponde a uma redução na PST de 31,46% em relação ao valor inicial. Por outro lado, o valor de PST referente ao tratamento de atriplex no espaçamento 2 x 2 m, que era de 40,98% inicialmente, passou a 29,61% após os 18 meses de cultivo (redução percentual de 27,75%). A maior redução (45,04%) foi obtida com o cultivo da atriplex espaçada a 1 x 1 m, em que a PST decresceu de 43,14 para 23,71%.

Embora a PST ainda tenha sido mantida acima do limite que define os solos como sódicos, o efeito dos tratamentos de correção (gesso e cultivo de atriplex) em relação ao tratamento controle foi considerável para o período de tempo avaliado. Qadir et al. (2007) relatam resultados efetivos de melhoria de solos sódicos em períodos bem mais longos do que o deste estudo. Além da redução na PST apresentada, o emprego da correção torna-se apreciável no âmbito de evitar o risco de aumento da sodicidade, tanto no tamanho da área degradada quanto no nível da degradação, como pode ser confirmado pelo aumento da PST no tratamento controle.

Na distribuição da PST entre as camadas do solo, sempre que aumentava a profundidade, a PST também apresentava valores mais altos (Figura 15). Como a variável é dependente dos teores de sódio, pode-se relacionar este comportamento à presença crescente do sódio em profundidade e a menor concentração de cálcio nessas camadas inferiores (Figura 11 a e c) que, provavelmente, foi devido às substituições iônicas ocorridas na primeira camada ocasionando maior presença de sódio nas camadas inferiores.

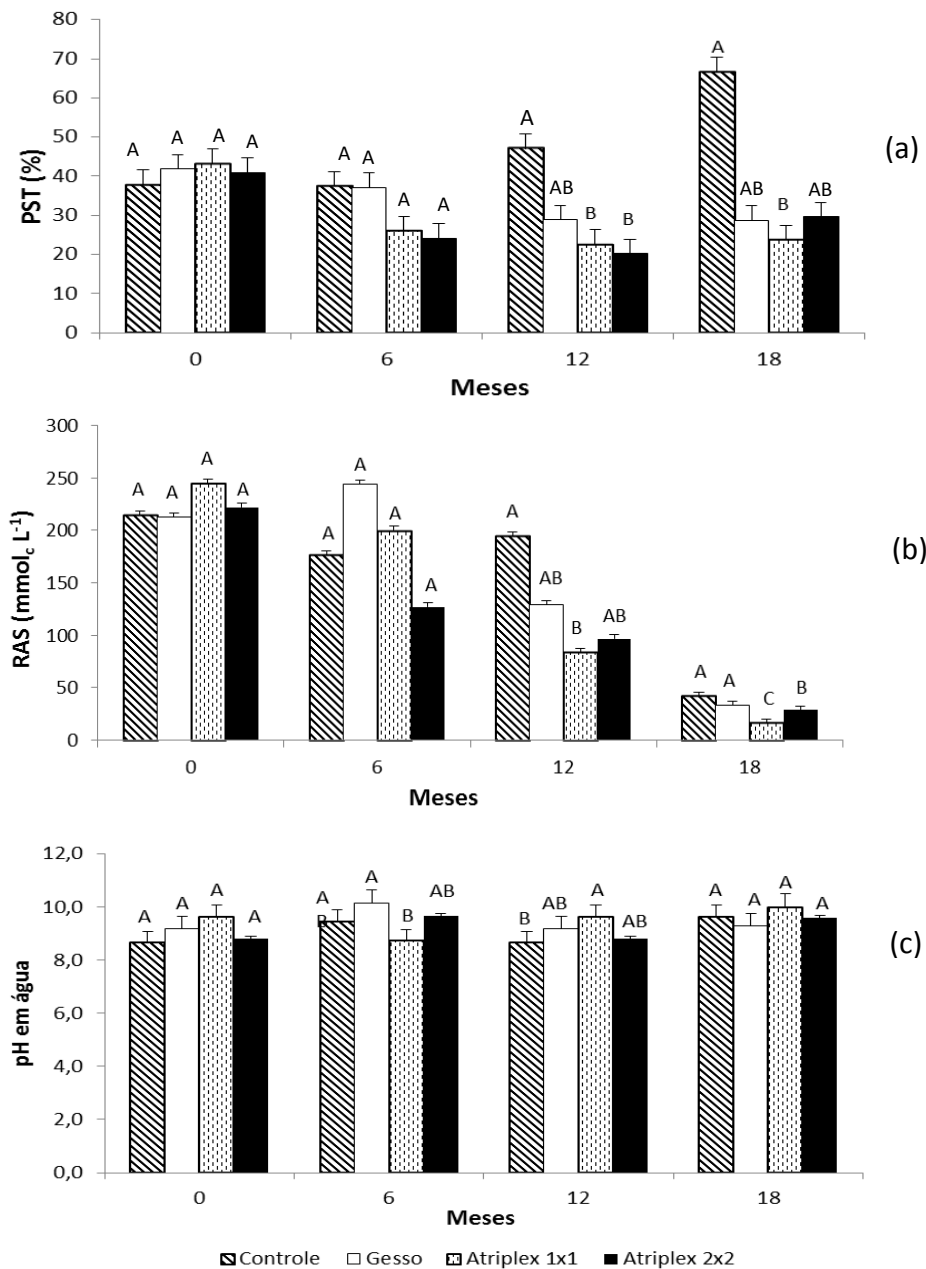


Figura 14 – Percentagem de sódio trocável (PST) (a), relação de adsorção de sódio (RAS) (b), e pH do solo (c), em função dos tratamentos controle, aplicação de gesso e cultivo de *Atriplex nummularia* nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m aos 0, 6, 12 e 18 MAT. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade, entre os tratamentos.

Quanto a RAS, o efeito dos tratamentos foram observados naqueles com emprego da fitorremediação, com o manejo da atriplex no espaçamento 1 x 1 m sobressaindo-se em relação às plantas espaçadas a 2 x 2 m (Figura 14b). É muito importante esta redução na RAS, pois indica a proporção do Na⁺ solúvel em relação

aos cátions bivalentes Ca^{2+} e Mg^{2+} , relação esta que promove alterações na fase trocável, pelo equilíbrio entre os elementos trocáveis e os da solução do solo.

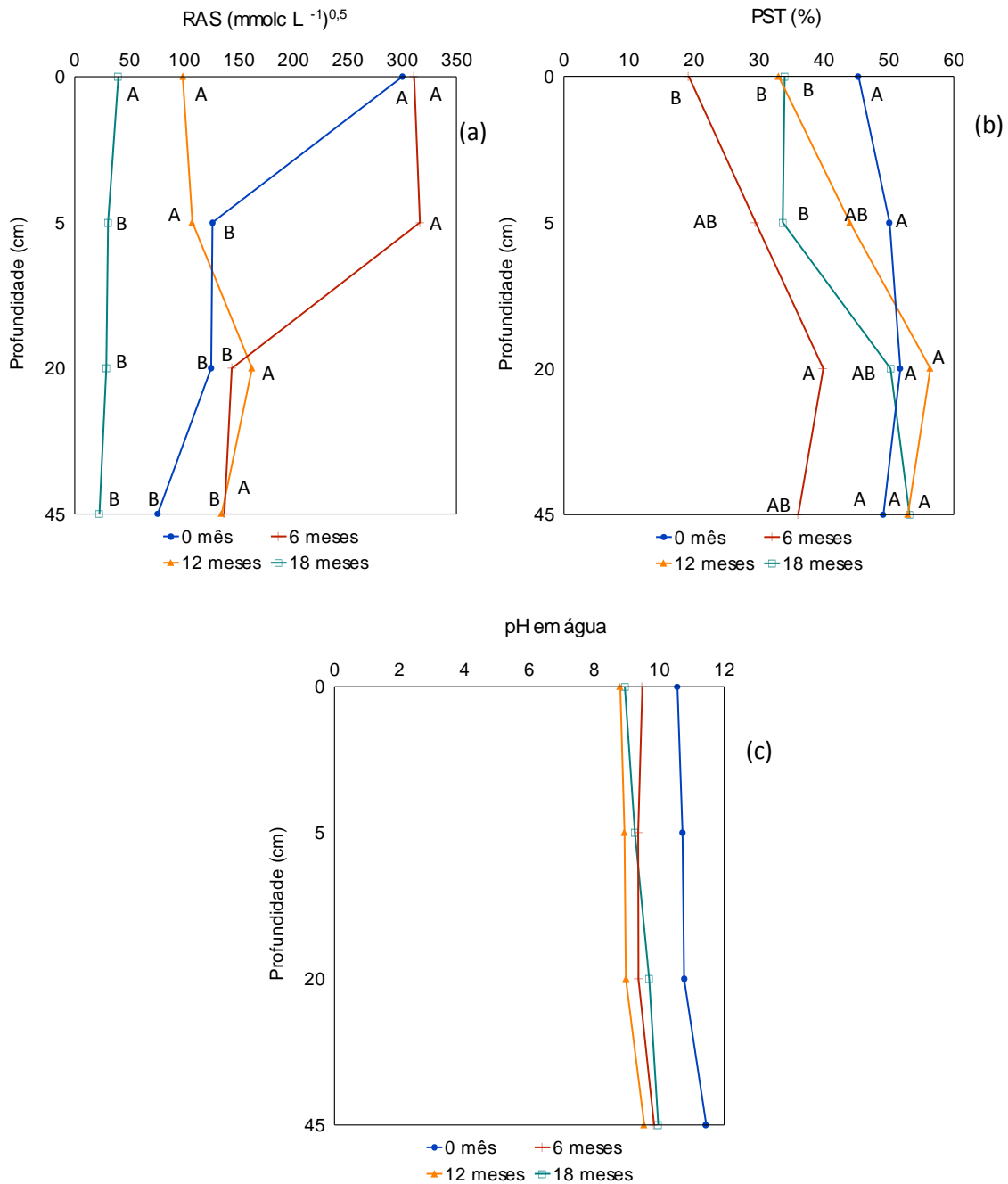


Figura 15 – Percentagem de sódio trocável (PST) (a), relação de adsorção de sódio (RAS) (b), e pH do solo (c), em função da profundidade aos 0, 6, 12 e 18 MAT. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, entre as épocas de avaliações.

O efeito dos tratamentos começou a ser observado aos 12 MAT (Tabela 12), com os valores médios da RAS dos tratamentos de correção inferiores ao do tratamento controle (Figura 14 b). Essa diferença, no caso do tratamento de

correção química é em resposta ao aporte de Ca^{2+} e Mg^{2+} fornecidos pelo gesso (Tabela 10). Já para os tratamentos de fitorremediação, a redução da RAS pode ser atribuída aos menores teores de sódio (Tabela 10), resultante da absorção do elemento pelas plantas.

Tabela 12 - Níveis de significância para relação de adsorção de sódio (RAS), percentagem de sódio trocável (PST) e pH em água em função dos tratamentos aplicados e da profundidade da camada de solo a cada época de coleta

Efeitos	RAS ¹	PST ¹	pH ¹	RAS ²	PST ²	pH ²	RAS ³	PST ³	pH ³	RAS ⁴	PST ⁴	pH ⁴
Tratamento	ns	ns	**	ns	ns	**	**	ns	**	**	**	ns
Profundidade	**	**	ns	ns	**	ns	ns	**	ns	**	**	**
Profundidade x tratamento	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	65,37	38,22	10,62	114,29	66,36	12,03	91,98	39,83	10,62	88,37	35,60	8,58

**Significativo a 5% de probabilidade pelo teste Tukey; ns não significativo. ¹Primeira coleta, ²Segunda coleta, ³Terceira coleta, ⁴Quarta coleta.

Ao final do experimento, os valores da RAS sofreram uma redução muito expressiva (Figura 15b). Este fato pode ser explicado pelo significativo acréscimo de Ca^{2+} e Mg^{2+} solúveis, deixando a solução do solo com maior proporção desses íons em relação aos outros períodos (Tabela 10). Diante disso, o efeito significativo, passou a ser observado apenas nos tratamentos com o cultivo de atriplex, entre os quais, o das plantas sob o espaçamento 1 x 1 m, foi mais efetivo na redução da RAS da solução do solo, o que pode estar relacionado à maior extração por área de sódio que o mesmo apresentou, comparado ao tratamento no espaçamento 2 x 2 m (Tabela 5).

Enquanto o tratamento de correção química com gesso não foi estatisticamente diferente do tratamento controle, o que, provavelmente tem conexão com o aumento nas concentrações de Na^+ no solo na última época de avaliação (Tabela 10), o qual confundiu o efeito do sortimento do elemento pelo corretivo.

Semelhantemente ao comportamento da CE e dos íons solúveis, os maiores valores de RAS aos 0, 6 e 18 meses de avaliação, foram registradas na camada superficial do solo, mostrando uma tendência decrescente ao longo do perfil do solo, com diferença estatística ($P > 0,05$). Este comportamento é regido pelas altas taxas

de evapotranspiração registradas na região do estudo, de clima semiárido, com um natural acúmulo de sais na superfície do solo, sobretudo de Na^+ (Figura 15).

De forma contrária, uma distribuição espacial mais homogênea da RAS ao longo do perfil analisado ocorreu aos 12 meses do experimento, não diferindo estatisticamente entre as camadas avaliadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% ($P > 0,05$). Os valores registrados na área evidenciam, mais uma vez, a lixiviação do elemento Na^+ no período estudado e, como a RAS é diretamente proporcional aos teores de Na^+ do solo, seus valores passaram a ser influenciados diretamente pela mobilidade deste elemento no extrato de saturação do solo.

A reação do solo mesmo com mudanças ao longo do tempo, manteve-se alcalina independentemente do tratamento e da época de avaliação, com valores de pH no intervalo de 8,65 a 10 (Figura 14c), com comportamento similar ao longo do perfil do solo (Figura 15c), refletindo a composição e natureza dos cátions trocáveis e sais solúveis presentes, essencialmente alcalina, diferentemente de solos mais intemperizados de zonas úmidas (Freire & Freire, 2007). Estes valores de pH se justificam pela presença de CO_3^{2-} e HCO_3^- na solução do solo (Tabela 11).

Santos et al. (2010) afirmam que solos com excesso de sódio apresentam uma forte reação alcalina, resultante da alcalinização provocada pela hidrólise do sódio trocável e do carbonato de sódio, cuja reação produz íons OH^- .

Aguiar Netto et al. (2007) afirmam que, sob condições de pH elevado, ocorrem mudanças de cargas líquidas das argilas, que passam de positivas para negativas. Os autores alegam que isso resulta na dispersão das argilas e ainda salientam sobre a influência da elevação do pH na solubilidade dos elementos essenciais e tóxicos existentes no solo e a atividade e diversidade de microrganismos do solo. Entretanto, de alguma forma as plantas de *Atriplex nummularia* Lindl conseguem sobreviver nestas condições, com elevada produção de biomassa e, portanto, mais uma vez se caracterizam como plantas potencialmente fitorremediadoras de solos afetados por sais.

4.7. PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

4.7.1. DENSIDADE DO SOLO E DE PARTÍCULAS

Os valores médios da densidade do solo (D_s) nas camadas estudadas variaram em relação aos tratamentos aplicados ($P < 0,05$), com o controle tendo os

maiores valores em todas as camadas avaliadas (Tabela 13), o que pode estar relacionado ao fato do solo nas parcelas do referido tratamento estar desnudo, ficando muito mais suscetível à degradação. De um modo geral, os tratamentos aplicados foram eficientes na diminuição do adensamento do solo, como comprovado pelos menores valores de densidade do solo (Tabela 13).

O processo de adensamento e/ou compactação provoca redução na qualidade física do solo, devido a alterações na estrutura do solo, e, por conseguinte, diminuição do volume de seus poros e aumento sua densidade (Silva et al. 2007).

Tabela 13 - Densidade do solo, densidade das partículas, porosidade total, macroporosidade e microporosidade para as camadas do solo em estudo em função dos tratamentos controle, aplicação de gesso e cultivo de *Atriplex nummularia* Lindl nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m

Tratamento	Densidade		Porosidade		
	Solo	Partículas	Total	Macro	Micro
	— Mg m ⁻³ —		cm ³ cm ⁻³		
0-5 cm					
Controle	1,70 A	2,71 A	0,50	0,09 B	0,41 A
Gesso	1,62 AB	2,80 A	0,48	0,08 B	0,40 A
Atriplex (1x1)	1,52 AB	2,68 A	0,51	0,08 B	0,43 A
Atriplex (2x2)	1,30 B	2,76 A	0,49	0,16 A	0,33 B
15-20 cm					
Controle	1,68 A	2,70 A	0,45	0,07 B	0,39 A
Gesso	1,67 A	2,71 A	0,50	0,11 A	0,38 A
Atriplex (1x1)	1,52 B	2,70 A	0,46	0,12 A	0,35 A
Atriplex (2x2)	1,57 B	2,62 A	0,44	0,17 A	0,27 B
40-45 cm					
Controle	1,68 A	2,74 A	0,49	0,08 A	0,41 A
Gesso	1,65 A	2,65 A	0,56	0,08 A	0,49 A
Atriplex (1x1)	1,64 A	2,68 A	0,43	0,08 A	0,35 A
Atriplex (2x2)	1,66 A	2,63 A	0,47	0,09 A	0,38 A
75-80 cm					
Controle	1,67 A	2,62 A	0,53	0,08 A	0,45 A
Gesso	1,46 B	2,74 A	0,51	0,08 A	0,43 A
Atriplex (1x1)	1,59 B	2,80 A	0,50	0,05 A	0,44 A
Atriplex (2x2)	1,56 B	2,64 A	0,46	0,09 A	0,37 B
CV (%)	11,01	10,00	10,29	34,57	11,68

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, entre os tratamentos. CV – coeficiente de variação.

Segundo Michelin et al. (2009), um solo sob processo de degradação, cuja estrutura foi alterada, apresenta aumento de sua densidade, além de redução na porosidade, principalmente a macroporosidade ou porosidade de aeração, em consequência da alteração de seu volume, resultante da expulsão de ar dos poros do solo. Nos tratamentos controle e gesso foram constatados indícios de

adensamento do solo, devido aos valores de densidade do solo superiores ao limite crítico (exceto na camada de 75-80 cm no tratamento com aplicação de gesso), que segundo Brady (1989) o nível crítico padrão da densidade do solo é quando o seu valor está acima de $1,60 \text{ g cm}^{-3}$. Já com o cultivo de plantas de atriplex, os altos valores só foram observados na camada de 40-45 cm de profundidade. Michelon et al. (2009) afirmam que valores de densidade maiores que $1,40 \text{ g kg}^{-1}$ já indicam compactação.

Há uma vasta referência na literatura (Aguiar Netto et al., 2006 e 2007; Klein, 2008, Spera et al., 2008; Ribeiro et al., 2009, Santos et al., 2010, Ferreira et al., 2010) que atribui esse adensamento em solos afetados por sais à dispersão e eluviação das partículas de argila que, ao se rearranjarem, alteram a matriz sólida do solo. Seu acúmulo nas camadas inferiores levam ao encrostamento superficial e à compactação subsuperficial do solo. Por sua vez, a porosidade natural passa a ser alterada pela obstrução dos poros.

A instalação das plantas de atriplex na área promoveu alterações significativas na D_s , conseguindo distinguir-se das parcelas sem tratamento de correção e, sugerindo a influência da presença dessa planta na manutenção da qualidade física do solo. Embora a presença de pedras e cascalhos, como é o caso do solo em estudo (Cambissolo Flúvico) mascare os valores da D_s , independentemente do método usado (Klein, 2008), a comparação é válida, já que o efeito desse material grosseiro pode estar presente em todos os tratamentos e profundidades avaliadas.

Quanto aos resultados de densidade de partículas (D_p), não foram observadas variações desta variável na área experimental (Tabela 13), o que era de se esperar, já que a D_p é um reflexo da composição mineralógica do solo e não é alterada pelo seu manejo. Os valores de D_p situaram-se na faixa de 2,62 a 2,80 g cm^{-3} , corroborando a afirmativa de Costa (2004), que indica valores altos de densidade de sólidos para os Cambissolos, em referência à densidade dos constituintes minerais predominantes nessa classe de solo, como quartzo, feldspatos e silicatos de alumínio coloidais.

4.7.2. ARGILA DISPERSA EM ÁGUA (ADA) E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM MEIO SATURADO (K_0)

A argila dispersa em água (ADA) inicialmente não diferiu entre os tratamentos aplicados, mas, a partir de 12 MAT, os efeitos do uso do gesso e do cultivo da

atriplex diminuíram a ADA em relação ao solo mantido sem nenhum manejo (Figura 16).

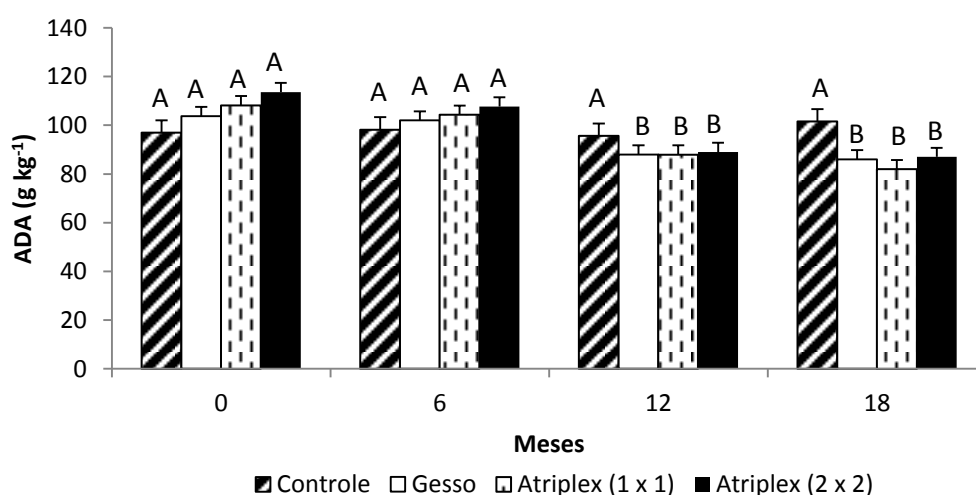


Figura 16 – Teores de argila dispersa em água (ADA) em função dos tratamentos controle, aplicação de gesso e cultivo de *Atriplex nummularia* Lindl nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m aos 0 (CV 28,59%), 6 (CV 20,5%), 12 (CV 33,09%) e 18 (CV 31,91%) MAT. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade entre os tratamentos.

Nas últimas avaliações (12 e 18 MAT), verificou-se que o controle foi o tratamento que teve o maior valor de ADA, o que refletiu no maior índice de dispersão deste em relação aos outros tratamentos (Figura 17). Com a aplicação dos tratamentos de correção (gesso ou cultivo de atriplex), os teores de ADA tenderam à redução, sendo observado, ao final do experimento, um decréscimo de 17,78 g kg⁻¹ de argila com o emprego do corretivo químico (gesso) e de 26,26 g kg⁻¹ e 26,59 g kg⁻¹ nos tratamentos de fitorremediação com atriplex nos espaçamentos de 1 x 1 e 2 x 2 m, respectivamente, em relação aos valores originais.

Com relação a profundidade do solo, os maiores valores de ADA estão em subsuperfície (Figura 18), na camada de 30-60 cm, comportamento que acompanha os teores de argila total (Tabela 1) e de sódio trocável (Figura 15b), cujos maiores valores médios também se encontram nos horizontes subsuperficiais. Este fato mostra a influência deste cátion nos processos de floculação/dispersão, o que deve ter promovido a movimentação descendente de coloides e sua concentração em camadas subsuperficiais deste solo.

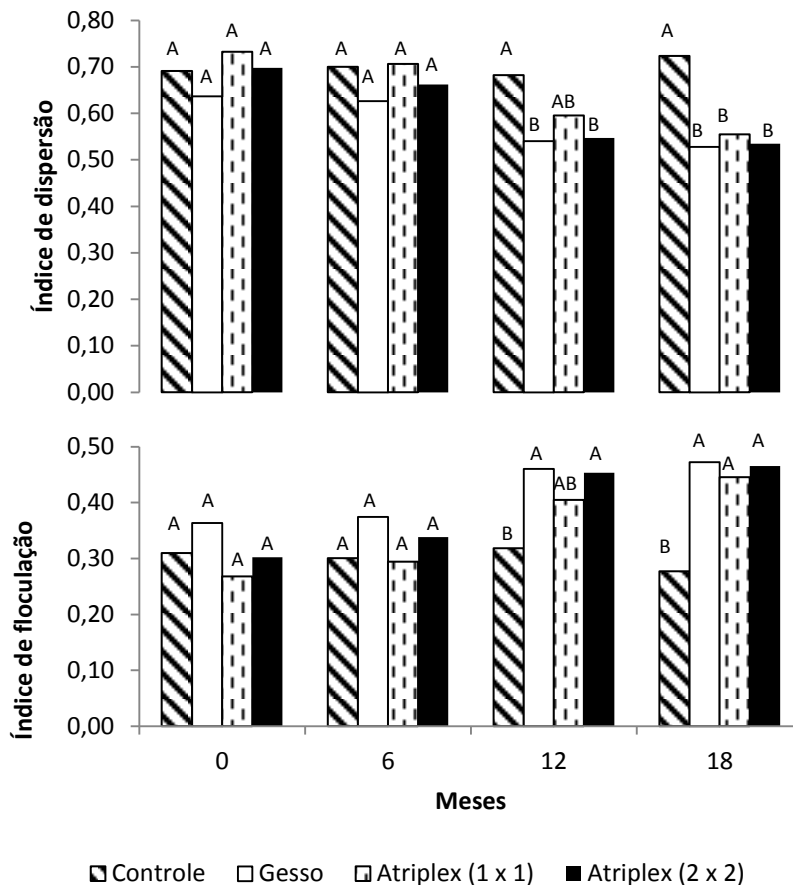


Figura 17 – Índices de dispersão e de floculação em função dos tratamentos controle, aplicação de gesso e cultivo de *Atriplex nummularia* Lindl nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m, aos 0; 6; 12 e 18 MAT. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade entre as camadas do solo.

As elevadas concentrações de argila dispersa em água são decorrentes da alta percentagem de sódio no complexo de troca do solo (Figura 11a), acarretando alto grau de dispersão das argilas, e cooperando para a manutenção de condições físicas desfavoráveis no solo. Esse cátion, por ser monovalente e possuir um alto raio hidratado atua na expansão da dupla camada elétrica difusa, junto à superfície das partículas coloidais. Nessa condição, a agregação das partículas de cargas negativas é desfavorecida, considerando o predomínio das forças repulsivas sobre as forças de van der Waals e outras forças atrativas.

O resultante afastamento das partículas unitárias do solo (silte, areia e argila) deriva-se na desestruturação do solo, ficando as partículas de argila em condições de ser facilmente transportada sob passagem de água proveniente da chuva ou da irrigação, da superfície do solo para seus horizontes subsuperficiais. Essa eluviação de coloides promove o preenchendo dos poros dos solos, reduzindo a aeração e a

infiltração de água (Santos et al., 2010). Diretamente relacionada a tais condições está a condutividade hidráulica, a qual expressa a facilidade com que um fluido é transportado através de um meio poroso (Libardi, 2005).

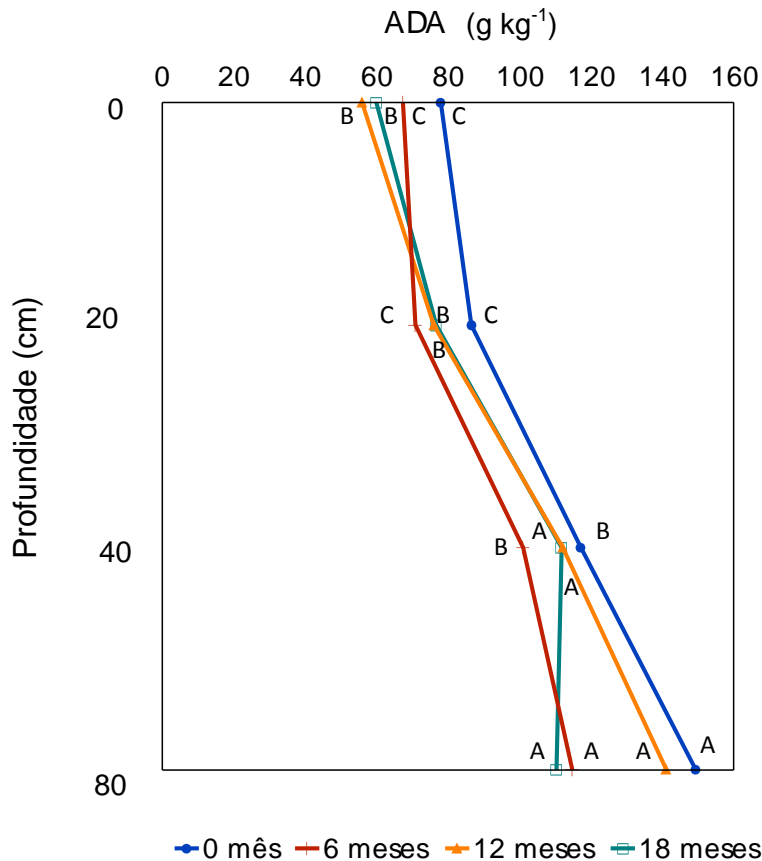


Figura 18 – Teores de argila dispersa em água (ADA) em função da profundidade do perfil aos 0 (CV 28,59%), 6 (CV 20,5%), 12 (CV 33,09%) e 18 (CV 31,91%) MAT. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade entre as camadas do solo.

Propriedades do solo que estejam relacionados com a forma de suas partículas, a superfície específica, a porosidade, a estrutura e a compactação, ou seja, todas as propriedades que refletem a geometria porosa do solo irão afetar diretamente a infiltração de água no seu perfil (Spera et al., 2008).

O solo da área em estudo teve valores muito baixos de condutividade hidráulica em meio saturado, especialmente nas camadas subsuperficiais (Figura 19), provavelmente decorrente do seu baixo grau de estruturação que, associado ao elevado conteúdo de argila dispersa em água (Figura 18), favoreceu o preenchimento dos poros pela argila. Outro fator que deve ter contribuído para o

comprometimento da condutividade hidráulica deste solo foi a textura, com aumento de argila em profundidade.

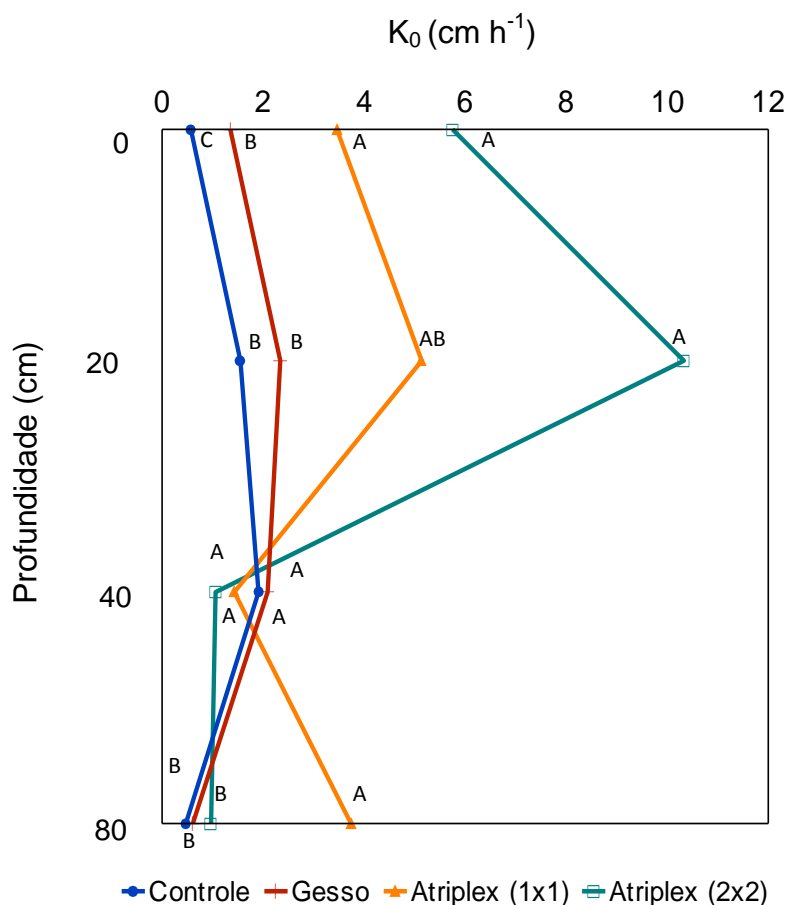


Figura 19 – Condutividade hidráulica em meio saturado do solo (K_0) em função dos tratamentos controle, aplicação de gesso e cultivo de *Atriplex nummularia* Lindl nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m nas camadas avaliadas (CV 162,9%). Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade entre os tratamentos.

Os resultados de condutividade hidráulica em meio saturado foram superiores nos tratamentos de cultivo de atriplex nos dois espaçamentos utilizados, especialmente quando mais próximo à superfície do solo, sendo seguidos do tratamento com o uso do gesso e superando o controle, com valor muito próximo de zero ($0,57 \text{ cm h}^{-1}$). Tal fato evidencia a forte resistência hidráulica provocada pelo característico encrostamento dos solos salinos e sódicos, que limita a transmissividade de água.

A superioridade dos valores de condutividade hidráulica dos tratamentos de correção do solo foi expressa em taxas de 6 (atriplex 1 x 1 m), 10 (atriplex 2 x 2 m) e

2 (gesso) vezes maiores que os do controle, atenuando a resistência característica da crosta salina superficial.

As maiores taxas de K_0 foram observadas nos tratamentos com o cultivo da atriplex (Figura 19), principalmente nas primeiras profundidades (até 20 cm), provavelmente fomentadas pela grande concentração de raízes observada no processo de amostragem do solo.

Desta forma, sugere-se que a presença de bioporos resultante da exploração do solo pelas raízes das plantas, possibilitou que o mesmo apresentasse o maior valor de condutividade hidráulica do solo saturado.

Os bioporos correspondem às cavidades do solo, originadas pela presença de minhocas e cupins e pelo desenvolvimento de raízes no interior do solo. Camadas superficiais do solo normalmente são dotadas de bioporos e resíduos de raízes. E, se presentes, estes grandes poros são preenchidos com água na saturação, dominando completamente o transporte de água na amostra (Ribeiro et al., 2007).

Os valores de condutividade hidráulica na crosta obtidos pelo tratamento com gesso indicam o efeito positivo do gesso sobre a melhoria da transmissividade de água. E esse efeito da elevação da condutividade hidráulica com aplicação de gesso em solo disperso por sódio pode ser explicado pela afirmação de Ruiz et al. (2006), que indicam haver a substituição do sódio pelo cálcio na micela, reduzindo a espessura da dupla camada difusa, de forma que a fração coloidal do solo, antes dispersa, agrega-se, restabelecendo a porosidade e melhorando a permeabilidade do solo. Os autores observaram melhoria nas condições físicas do solo com subsequente elevação da transmissão de água no solo.

Esse comportamento observado na crosta também pode ser atribuído ao revolvimento o solo no processo de incorporação do gesso, causando alteração na estrutura original do solo nos seus primeiros centímetros.

Na camada seguinte, de 15-20 cm, a K_0 foi superior à observada na de 0-5 cm (crosta+solo), entretanto, as diferenças entre os tratamentos ocorreram de maneira equivalente à da superfície do solo. Além dos motivos já discutidos, a influência do teor de areia total no comportamento da resistência hidráulica do solo, pode se configurar como explicação para tais diferenças, que está associada ao evidente aumento da macroporosidade do solo (Tabela 13).

Os altos valores da densidade do solo e da microporosidade relativamente à macroporosidade observados na camada de 40-45 cm (Tabela 13), podem ser decorrentes de alterações estruturais promovidas pelo sódio na compactação de

solo. Esse efeito está relacionado com a obstrução dos poros, principalmente dos macroporos, que provocou decréscimo da condutividade hidráulica do solo (Freire et al., 2003).

A alta afinidade entre a macroporosidade e a condutividade hidráulica do solo saturado faz com que haja interferência mútua entre essas propriedades, principalmente porque a densidade de fluxo que passa por um poro é proporcional à quarta potência de seu diâmetro (Reichert et al., 2007). É reconhecida na literatura que, para que um solo disponha de condições ideais de aeração, sua concentração de macroporos precisa ser superior a 10% (Ribeiro et al., 2007; Klein, 2008). Portanto, os valores de macroporosidade na camada de 15-20 cm evidenciam a adequabilidade da variável para explicar o comportamento hidráulico do solo, uma vez que a análise estatística não revelou diferença entre os tratamentos.

A restrição à permeabilidade da água deste solo foi ainda maior na camada de 75-80 cm, com exceção do tratamento com cultivo de atriplex no espaçamento 1 x 1 m. Nessa camada, o solo apresentou-se com maior valor de microporosidade em relação à macroporosidade (Tabela 13). O fato pode estar relacionado ao aumento da compactação do solo, o qual acarreta aumento dos microporos e, principalmente, diminuição dos macroporos, determinando redução na condutividade hidráulica em meio saturado.

A granulometria do solo também se apresenta como uma das justificativas para a maior diversidade de microporos, sendo o solo constituído predominantemente pelas frações areia e silte, mas, no fracionamento da areia, prevalece a areia fina (Tabela 1). Além disso, incremento de argila, provavelmente resultante do processo de lessivagem, foi observado nessa camada. Assim, as partículas do solo tendem a se organizarem a distâncias muito próximas entre si, com o estabelecimento de um contato face a face, gerando uma estrutura mais adensada, na qual os grãos de areia fina e silte ocupam os espaços dos poros formados pela areia mais grossa, fazendo com que predominem no solo os poros pequenos (Ribeiro et al., 2007).

Em estudo conduzido em solos salinizados de um perímetro irrigado, Aguiar Netto et al. (2006) encontraram valores de velocidade de infiltração muito abaixo do padrão estabelecido e relacionaram o evento aos processos de salinização e compactação.

No entanto, como já citado, o solo do tratamento com cultivo de atriplex no espaçamento 1 x 1 m teve o maior valor de K_0 nesta camada, superando os valores

de infiltração dos outros tratamentos. Portanto, a dimensão dos poros do solo não foi uma variável suficientemente apropriada para esclarecer o comportamento hidráulico dos mesmos. Inclusive porque os atributos físico-hídricos dos solos são significativamente influenciados pela estrutura dos mesmos, a qual pode ter sofrido interferência, além dos fatores já discutidos, da presença de cascalhos, característica típica dos Cambissolos.

Montenegro & Montenegro (2006) encontraram valores diversos de condutividade hidráulica em um solo aluvial, como o do presente estudo, afirmando que as altas dispersões em tais solos estão associadas aos processos geomorfológicos. E ainda colocam que, devido à importância dessa propriedade, torna-se relevante a investigação de sua correlação com a textura e outros atributos físicos dos solos.

Reichardt et al. (2007) atribuem os altos coeficientes de variação da condutividade hidráulica às alterações estruturais, compactação, teor de água no solo, expansão e contração do solo, concentração eletrolítica de sais solúveis entre outras características do meio.

É importante considerar que, apesar da elevada variabilidade espacial desta variável, aqui evidenciada pelo coeficiente de variação de 162,9%, ela não deixa de ser importante na caracterização da qualidade estrutural do solo (Libardi, 2005) e é a maneira possível de se avaliar como as propriedades químicas associadas à salinização de solos influem no comportamento físico de solos sob estas condições. Por outro lado, a K_0 também define a possibilidade de uso de solos sob irrigação, manejo necessário em áreas sob clima árido e semiárido. Quando a K_0 do solo é limitante, não se indica a irrigação, pela elevada possibilidade de desagregação de partículas, conseqüentemente, aumento do processo erosivo, aumentando mais a degradação. Portanto, é preciso avaliar as propriedades químicas e físicas destes solos para que seja definido o manejo mais adequado ao sistema, minimizando a degradação.

5. CONCLUSÕES

- O cultivo de *Atriplex nummularia* Lindl no espaçamento 2 x 2 m promoveu maior produção de forragem e maior extração de nutrientes por planta;
- O maior rendimento de matéria fresca e seca de *Atriplex nummularia* por área Lindl foi obtido com o espaçamento 1 x 1 m;
- O regime de podas frequentes foi eficiente na estimulação do crescimento e na rebrota das plantas, com material menos lignificado que pode ser usado na alimentação animal;
- Foram detectadas reduções na salinidade e sodicidade do solo com o cultivo da *Atriplex nummularia* Lindl ou o uso de gesso;
- A *Atriplex nummularia* Lindl caracterizou-se como planta hiperacumuladora de sódio e cloro, com potencial de uso na fitoextração destes elementos de solos afetados por sais;
- O cultivo da *Atriplex nummularia* Lindl e a aplicação do gesso foram favoráveis à qualidade física do solo, com o incremento na condutividade hidráulica em meio saturado do solo, diminuição do teor de argila dispersa em água e a descompactação do solo estudado, comprovada pela diminuição da D_s .

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCIOLY, M. A. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., SCHAEFER, C. E. (Eds). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Volume I. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa: UFV, 2000. p. 299-352.
- AGANGA, A. A.; MTHETHO, J. K.; TSHWENYANE, S. *Atriplex nummularia* (Old Man Saltbush): A potential forage crop for arid regions of botswana. Pakistan Journal of Nutrition, v.2, n. 2, p. 72-75, 2003.
- AGUIAR NETTO, A. de O.; GOMES, C. C. S.; LINS, C. C. V.; BARROS, A. C.; CAMPECHEN, L. F. de S. M.; BLANCO, F. F. Características químicas e salino-sodicidade dos solos do Perímetro Irrigado Califórnia, SE, Brasil. Ciência Rural, v.37, n.6, p.1640-1645, 2007.
- AGUIAR NETTO, A. de O.; MACHADO, R.; BARRETO, M. C. de V. Diagnóstico do processo de salino-sodificação no Perímetro Irrigado de Jabiberi-SE. Irriga, v.11. n.4. p.448-459, 2006.
- ALMEIDA, A. C. S. de; FERREIRA, R. L. C.; SANTOS, M. V. F. dos; SILVA, J. A. A. da; LIRA, M. A. Caracterização de produtores e propriedades rurais em três municípios do estado de Pernambuco. Caatinga, v.19, n.4, p.323-332, 2006.
- ALVES, J. N.; ARAÚJO, G. G. L.; PORTO, E. R.; CASTRO, J. M.; SOUZA, L. C. Feno de erva-sal (*Atriplex nummularia* Lindl) e palma forrageira (*Opuntia ficul* Mill) em dietas para caprinos e ovinos. Revista Científica de Produção Animal, v.9, n.1, p.43-52, 2007.
- ANDRADE, E. M.; D'ALMEIDA, D. M. B. A.; MIERELES, A. C. M.; LEMOS FILHO, L. C. A.; ARRUDA, F. E. R. Evolução da concentração iônica da solução do solo em áreas irrigadas na Chapada do Apodi, Ceará. Revista Ciência Agronômica, v.35, n.1, p.9-16, 2004.
- APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima. Boletim de informações climáticas. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos, Recife, 2011.
- ARAÚJO, A. P. B. de; COSTA, R. N. T.; LACERDA, C. F. de; GHEYI, H. R. Análise econômica do processo de recuperação de um solo sódico no Perímetro Irrigado Curu-Pentecoste, CE. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.4, p.377–382, 2011.

ARAÚJO, G. G. L. Erva-sal: uma alternativa alimentar no semi-árido. Petrolina, 2003. Disponível em: <http://www.cpatsa.embrapa.br/catalogo/cultivoestrategicoforrageiras.pdf>> Acesso em: 15.abr.2011.

ARAÚJO, G. G. L.; PORTO, E. R. Produção e composição química da erva-sal, irrigada com rejeito da dessalinização de água salobra, In: SIMPÓSIO NORDESTINO DE ALIMENTAÇÃO DE RUMINANTES, Anais: SNPA, v.2, p.115-117, 2000.

ARAÚJO, S. A. M. de; SILVEIRA, J. A. G.; ALMEIDA, T. D.; ROCHA, I. M. A.; MORAIS, D. L.; VIÉGAS, R. A. Salinity tolerance of halophyte *Atriplex nummularia* L. grown under increasing NaCl levels. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, n.4, p.848-854, 2006.

ASHRAF, M. & HARRIS, P. J. C. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. Plant Science, 166:3 16. 2004.

AZEVEDO NETO, A. D; PRISCO, J. T; ENÉAS FILHO, J.; LACERDA, C. F. de; SILVA, J. V.; COSTA, P. H. A. da; GOMES FILHO, E. Effects of salt stress on plant growth, stomatal response and solute accumulation of different maize genotypes. Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal, v. 16, n. 01, p. 31-38, 2004.

AZEVEDO, C. M. da S. B.; PEDROSA, G. P.; MEDEIROS, J. F. de; NUNES, G.H. de S. Uso de *Atriplex nummularia* na extração de sais de solos irrigados com efluentes salinos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, p.300-304, 2005. (Suplemento).

BARROS, M. de F. C.; BEBÉ, F. V; SANTOS, T. O. dos; CAMPOS, M. C. C. Influência da aplicação de gesso para correção de um solo salino-sódico cultivado com feijão caupi. Revista de Biologia e Ciências da Terra. v. 9, n. 1, p. 77 – 82, 2009.

BARROS, M. de F. C.; FONTES, M. P. F.; ALVAREZ V., V. H.; RUIZ, H. A. Aplicação de gesso e calcário na recuperação de solos salino-sódicos do estado de Pernambuco. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, n.3, p.320-326, 2005.

BARROS, M. de F. C.; FONTES, M. P. F.; ALVAREZ, V. H.; RUIZ, H. A. Recuperação de solos afetados por sais pela aplicação de gesso de jazida e calcário no Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.8, n.1, p.59-64, 2004.

- BARROSO, D. D.; ARAÚJO, G. G. L. DE; PORTO, E. R.; PORTO, F. R. Produtividade e valor nutritivo das frações forrageiras da erva-sal (*Atriplex nummularia*) irrigada com quatro diferentes volumes de efluentes da criação de tilápia em água salobra. *Agropecuária Técnica*, v.27, n.1, p.43–48, 2006.
- BELO, A. F.; SANTOS, E. A.; SANTOS, J.B.; FERREIRA, L. R.; SILVA, A. A.; CECON, P. R.; SILVA, L. L. Fitorremediação se solo adubado com composto orgânico e contaminado com Triplóxyssulfuron-sodium. *Planta Daninha*, v. 25, n. 2, p. 251-258, 2007.
- BEN SALEM, H., NEFZAOU, A., BEN SALEM, L. Spineless cactus (*Opuntia ficus indica* f. *nervis*) and oldman saltbush (*Atriplex nummularia* L.) as alternative supplements for growing Barbarine lambs given straw-based diets. *Small Ruminant Research*, v. 51, p. 65–73. 2004.
- BENNETT, S. J.; BARRETT-LENNARD, E. G.; COLMER, T. D. Salinity and waterlogging as constraints to saltland pasture production: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.129, p. 349–360, 2009.
- BEULTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, n.6, p.581-588, 2004.
- BLANCO, F. F.; FOLEGATTI, M. V. Doses de N e K no tomateiro sob estresse salino: II. Crescimento e partição de matéria seca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.1, p.34–40, 2008.
- BLUMWALD, E.; Sodium transport and salt tolerance in plant cells. *Current Opinion of Cell Biology*, v. 12, p. 76-112, 2000.
- BONILLA, O. H.; TABOSA, J. N.; GALINDO, F. A. T.; AZEVEDO NETO, A. D. de. *Atriplex – Nova forrageira para solos salinizados no semi-árido nordestino*. Recife: IPA, 2000. (Série documentos).
- BRADY, N.C. *Natureza e propriedades dos solos*. 7ª. ed. São Paulo: Freitas Bastos, 1989. 878p.
- BRANDÃO, V. S., DEMETRIUS, D. D. S.; RUIZ, H. A.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MARTINEZ, M. A.; MENEZES, S. J. M. C de. Resistência hidráulica da crosta formada em solos submetidos a chuvas simuladas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, p. 13-21, 2006.

BRILHANTE, J. C. A. Contribuição de solutos orgânicos e inorgânicos no potencial osmótico de folhas de *Atriplex nummularia* submetidas ao NaCl, seca e PEG. 2006. 195 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

CARMONA, F. de C.; ANGHINONI, I.; HOLZSCHUH, M. J.; ANDRIGHETTI, M. H. Cation dynamics in soils with different salinity levels growing irrigated rice. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 1851-1863, 2010.

CARVALHO JÚNIOR S. B. de; FURTADO, D. A.; SILVA, V. R. da; DANTAS, R. T.; LIMA, I. S. P.; LIMA, V. L. A. de. Produção e avaliação bromatológica de espécies forrageiras irrigadas com água salina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 10, p.1045–1051, 2010.

CAVALCANTE, L. F.; SANTOS, R. V. dos; FERREYRA F. F. H.; GHEYI, H. R.; DIAS, T. J. Recuperação de solos afetados por sais. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. Manejo da salinidade na agricultura. Fortaleza, INCT Sal, 2010. p. 472.

CERDA, E.; ALDACO, R.; MONTEMAYOR, J.; FORTIS, M.; OLAGUE, J.; VILLAGÓMEZ, J.C. Aprovechamiento y mejoramiento de um suelo salino mediante el cultivo de pastos forrajeros. *Técnica Pecuaria en México*, v. 45, n. 1, p. 19–24, 2007.

COSTA, J. B. Caracterização e constituição do solo. 7 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2004. 527p.

COSTA, P. H. A.; SILVA, J.V.; BEZERRA, M.A.; FILHO, E.J.; PRISCO, J. T.; FILHO, E.G. Crescimento e níveis de solutos orgânicos e inorgânicos em cultivares de *Vigna unguiculata* submetidos à salinidade. *Revista Brasileira de Botânica*, v. 26, n. 3, p. 289-297, 2003.

COSTA, R. N. T.; SAUNDERS, L. C. U.; OLIVEIRA JÚNIOR, N. M. de; BISERRA, J. V. Indicadores econômicos da recuperação de um solo sódico em condições de drenagem subterrânea no Vale do Curu, CE. *Irriga*, v.10, p.272-278, 2005.

COUTINHO, H.; D; BARBOSA, A. R. Fitorremediação: Considerações gerais e características de utilização. *Silva Lusitana*, v. 15, n. 1, p. 103-117, 2007.

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F. efeitos dos sais no solo e na planta. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. In: Manejo da salinidade na agricultura. Fortaleza, INCT Sal, 2010. p. 472.

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. Estudos para a avaliação da disponibilidade hídrica do Açude Público Cachoeira II – Município de Serra Talhada – PE. Relatório apresentado ao DNOCS em julho de 1999.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 2006. 412p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. Nutrição mineral de plantas: Princípios e perspectivas. Planta, ed. 2, 2006. 401p.

ESTEVES, B. S; SUZUKI, M. S. Efeito da salinidade sobre as plantas. Ecologia Brasileira, v.12, n. 4, p. 662-679, 2008.

FAO. Estudios de caso de especies vegetales para zonas aridas y semiaridas de Chile y Mexico. Santiago: FAO Oficina Regional para America Latina y el Caribe, 1996, 143p. (FAO Zonas Aridas e Semiaridas;10).

FERNANDES, J. G. Caracterização de águas e solos do perímetro irrigado Cachoeira II, Serra Talhada – PE. Recife, UFRPE, 2008. 91 p.. (Dissertação de mestrado).

FERNANDES, J. G.; FREIRE, M. B. G. dos S.; CUNHA, J. C.; GALVÍNCIO, J. D.; CORREIA, M. M.; SANTOS, P. R. dos. Qualidade físico-química das águas utilizadas no Perímetro Irrigado Cachoeira II, Serra Talhada, Pernambuco. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v. 4, n. 1, p. 27-34, 2009.

FERREIRA, P. A.; DILVA, J. B. L. da; RUIZ, H. A. Aspectos físicos e químicos de solos em regiões áridas e semi-áridas. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. Manejo da salinidade na agricultura. Fortaleza, INCT Sal, 2010. p. 472.

FLOWERS, T. J., TROKE P. F., YEO A. R. The mechanism of salt tolerance in halophytes. Annual Review Plant Physiology, v. 28, p. 89–12,1977.

FREIRE, A. L. O.; RODRIGUES, T. J. D. A Salinidade do solo e seus reflexos no crescimento, nodulação de teores de N, K e Na em *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Vit.) Engenharia Ambiental, v. 6, n. 2, p. 163-173, 2009.

FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; ROCHA, A. T. da, OLIVEIRA, A. C. de. Gesso mineral do Araripe e suas implicações na produtividade agrícola na cana-de-açúcar no estado de Pernambuco, Brasil. Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica, vol. 4, p.199-213, 2007.

FREIRE, M. B. G. dos S.; FREIRE, F. J. Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, 2007. 1017 p.

FREIRE, M. B. G. dos S.; RUIZ, H. A.; RIBEIRO, M. R.; FERREIRA, P. A.; ALVAREZ, V. H. & FREIRE, F, J. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 7, n. 1, p. 45- 52, 2003.

FREIRE, M. B. G. S.; SOUZA, E. R. FREIRE, F. J. Fitorremediação de solos afetados por sais. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. Manejo da salinidade na agricultura. Fortaleza, INCT Sal, 2010. p. 472.

GALVANI, F.; GAERTNER, E. Adequação da metodologia Kjeldahl para determinação de nitrogênio total e proteína bruta. EMBRAPA, 2006. (Circular técnica).

GARCIA, G, de O.; FERREIRA, P. A.; MIRANDA, G.V.; NEVES, J. C. L.; MORAES, W. B.; SANTOS, D. B. dos. Teores foliares dos macronutrientes catiônicos e suas relações com o sódio em plantas de milho sob estresse salino. IDESIA, v. 25, n. 3, p. 93-106, 2007.

GARCIA, G. de O.; MARTINS FILHO, S.; REIS, E. F. dos; MORAES, W. B.; NAZÁRIO, A. de A. Alterações químicas de dois solos irrigados com água salina. Revista Ciência Agronômica, v. 39, n.1, p. 7-18, 2008.

GHEYI, H. R. Problemas de salinidade na agricultura irrigada. In: Oliveira, T.; ASSIS, J. R.; R. N.; ROMERO, R. E.; SILVA, J. R. C. (Eds). Agricultura, sustentabilidade e o semiárido. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 329-345, 2000.

GLENN, E. P.; MCKEON, C. GERHART, V.; NAGLER, P. L. JORDAN, F.; ARTIOLA, J. Deficit irrigation of a landscape halophyte for reuse of saline waste water in a desert city. Landscape and Urban Planning, v. 89, p. 57–64, 2009.

- GONÇALVES, I. V. C.; FREIRE, M. B. G. dos S.; SANTOS, M. A. dos; SOUZA, E. R. de; FREIRE, F. J. Alterações químicas de um Neossolo Flúvico irrigado com águas salinas. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 3, p. 589-596, 2011.
- GONDIM, T. M. de S.; CAVALCANTE, L. F.; BELTRÃO, N. E. de M. Aquecimento global: Salinidade e consequências no comportamento vegetal. *Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas*, v.14, n.1, p. 37-54, 2010.
- GUMA, I. R.; PADRON-MEDEROS, M. A.; SANTOS-GUERRA, A.; REYES-BETANCORT, J. A. Effect of temperature and salinity on germination of *Salsola vermiculata* L. (Chenopodiaceae) from Canary Islands. *Journal of Arid Environments*, v. 74, n. 6, p. 708-711, 2010.
- HOLANDA, J. S.; VITTI, G. C.; SALVIANO, A. A. C.; MEDEIROS, J. D. F.; AMORIM, J. R. A. Alterações nas propriedades químicas de um solo aluvial salino-sódico decorrentes da subsolagem e do uso de condicionadores. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, n. 3, p. 387-394, 1998.
- HOLANDA, J. S.; AMORIM, J. R. A.; NETO, M. F.; HOLANDA, A. C. Qualidade da água para irrigação. In: GHEYI, R.H.; DIAS, N.S.; LACERDA, C.F. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCT Sal, 2010. 472 p.
- KLEIN, V. A. Física do solo. UPF, v. 1, 2008. 212 p.
- KOYRO, H. W. Effect of salinity on growth, photosynthesis, water relations and solute composition of the potential cash crop halophyte *Plantago coronopus* (L.). *Environmental and Experimental Botany*, v.56, n.2, p.136-146, 2006.
- KRISHNAPILLAI, M.; RANJAN, R. S. Evaluating the phytoremediation potential of *Atriplex patula* on salt contaminated soil. Written for presentation at the CSAE/SCGR 2005 Meeting Winnipeg, p. 26-29, 2005.
- LÄUCHLI, A.; GRATTAN, S. R. Plant growth and development under salinity stress. In: JENKS, M. A.; HASEGAWA, P. M.; JAIN, S. M. Advances in molecular breeding toward drought and salt tolerance crops. Dordrecht: Springer, 2007. p 1-32.
- LEAL, I. G.; ACCIOLY, A. M. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, M. B. G. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; FERREIRA, F. L. Fitorremediação de solo salino sódico por *Atriplex nummularia* e gesso de jazida. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 1065-1072, 2008.

- LEITE, E. M., DINIZ, A. A.; CAVALCANTE, L. F.; RAIJ, H. G.; CAMPOS, V. B. Redução da sodicidade em solo irrigado com a utilização de ácido sulfúrico e gesso agrícola. *Revista Caatinga*, v. 23, n. 2, p. 110-116, 2010.
- LEITE, E. M.; CAVALCANTE, L.F.; DINIZ, A. A.; SANTOS, R. V. dos.; ALVES, G da S.; CAVALCANTE, I. H. L. Correção da sodicidade de dois solos irrigados em resposta à aplicação de gesso agrícola. *Irriga*, v. 12, n. 2, p. 168-176, 2007.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 335p.
- LOPES, J. F. B.; ANDRADE, E. M. de; CHAVES, L. C. G. Impacto da irrigação sobre os solos de perímetros irrigados na Bacia do Acaraú, Brasil. *Engenharia Agrícola*, v. 28, n. 1, p. 34-43, 2008.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 219p.
- MÄSER, P.; GIERTH, M.; SCHROEDER, J.I. Molecular mechanisms of potassium and sodium uptake in plants. *Plant and Soil*, v. 247, p. 43-54, 2002.
- MEDEIROS, J. F.; DIAS, N. S.; BARROS, A. D. Manejo da irrigação e tolerância do meloeiro a salinidade da água de irrigação. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 3, n. 3, p. 242-247, 2008.
- MEDEIROS, P. R. F. de; DUARTE, S. N.; DIAS, C. T. S. Tolerância da cultura do pepino à salinidade em ambiente protegido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.13, n. 4, p. 406–410, 2009.
- MELO, R. M.; BARROS, M. de F. C.; SANTOS, P. M. dos; ROLIM, M. M. Correção de solos salino-sódicos pela aplicação de gesso mineral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n. 4, p. 376–380, 2008.
- MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; MELO, G. L.; SPOHR, R. B.; ANDRADE, J. G. de. Qualidade física dos solos irrigados de algumas regiões do Brasil Central. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.1, p. 39–45, 2009.
- MIRANDA, M. A.; OLIVEIRA, E. E. M. de, SANTOS, K. C. F. dos; FREIRE, M. B. G. S.; ALMEIDA, B. G. de. Condicionadores químicos e orgânicos na recuperação de solo salino-sódico em casa de vegetação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 5, p.484–490, 2011.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica em planície aluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.1, p.30–37, 2006.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. Aproveitamento Sustentável de Aqüíferos Aluviais no Semiárido. IN: CABRAL, J. S. P.; FERREIRA, J. P. C. L.; MONTENEGRO, S. M. G.; COSTA, W. D. Água Subterrânea: Aqüíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento. Tópicos especiais em Recursos Hídricos. Recife: ed. Universitária da UFPE, 2004. 447p.

MORAIS, D. L.; VIÉGAS, R. A.; SILVA, L. M. M.; LIMA JUNIOR, A. R.; COSTA, R. C. L.; ROCHA, I. M. A.; SILVEIRA, J. A. G. Acumulação de íons e metabolismo de N em cajueiro anão em meio salino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.11, n.2, p.125-133, 2007.

MOTA, F. O. B.; OLIVEIRA, J. B. Mineralogia de solos com excesso de sódio no estado do Ceará. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, n. 4, p. 799-806, 1999.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Plant Biologic*, v. 59, p. 651–81, 2008.

MUNNS, R.; JAMES R. A.; LÄUCHLI, A. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany*, v.57, n.5, p.1025–1043, 2006.

MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell Environment*, v.25, n.5, p.659-662, 2002.

MUNNS, R. Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist*, v. 167, n. 03, p. 645-663, 2005.

NASCIMENTO, C. W. A.; ACCIOLY, A. M. A.; BIONDI, C. M. Fitoextração de metais pesados em solos contaminados: Avanços e perspectivas. In: Ribeiro, M.R. et al. Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 4, 2009. 497p.

OLIVEIRA, B. C.; CARDOSO, M. A. A.; OLIVEIRA, J. C.; OLIVEIRA, F. A.; CAVALCANTE, L. F. Características produtivas do tomateiro submetido a diferentes níveis de sais, na água de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.1, p.11–16, 2007.

- PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A.; QUEIROZ, M. E. I. R., PROCÓPIO, S. O.; SANTOS, J. B.; SANTOS, E. A.; CECON, P. R. Seleção de plantas com potencial de fitorremediação de Tebuthiron. *Planta Daninha*, v. 21, n. 3, p. 451-458, 2003.
- PORTO, E. R.; AMORIM, M. C. C.; SILVA JÚNIOR, L. G. de A. Uso do rejeito da dessalinização de água salobra para irrigação da erva-sal (*Atriplex nummularia*). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 5, p.111-114, 2001.
- PORTO, E. R.; AMORIM, M. C. C. DE; DUTRA, M. T.; PAULINO, R. V.; BRITO, L. T. L.; MATOS, A. N. B. Rendimento da *Atriplex nummularia* irrigada com efluentes da criação de tilápias em rejeito da dessalinização de água. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, n. 1, p. 97-103, 2006.
- PORTO, E. R.; ARAÚJO, G. G. L. Erva-sal (*Atriplex nummularia*). Petrolina, PE: EMBRAPA Semi-árido, 2000, 4 p. (EMBRAPA Semi-árido. Instruções Técnicas, 22).
- PRISCO, J. T.; GOMES FILHO, E. Fisiologia e bioquímica do estresse salino em plantas. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. In: Manejo da salinidade na agricultura. Fortaleza, INCT Sal, 2010. p. 472.
- PROCÓPIO, S. O.; SANTOS, J. B.; SILVA, A. A.; PIRES, F. R.; RIBEIRO JUNIOR, J. I.; SANTOS, E. A.; FERREIRA, L. R. Seleção de plantas com potencial para Fitorremediação de solos contaminados com Herbicida Trifloxysulfuron Sodium. *Planta Daninha*, v. 22, n.2, p. 315-322, 2005.
- QUEIROZ, J. E.; GONÇALVES, A. C. A.; SOUTO, J. S.; FOLEGATTI, M. V. Avaliação e monitoramento da salinidade do solo. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. Manejo da salinidade na agricultura. Fortaleza, INCT Sal, 2010. p. 472.
- QADIR, M.; GHAFOR, A.; MURTAZA, G. Use of saline-sodic waters through phytoremediation of calcareous saline-sodic soils. *Agricultural Water Management*, v. 50, p. 197-210, 2001.
- QADIR, M.; OSTER, J. D.; SCHUBERT, S.; NOBLE, A. D.; SAHRAWAT, K. L. Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Advances in Agronomy*, v. 96, p. 197-247, 2007.

- RAVINDRAM, K. C.; VENKATESAN, K.; BALAKRISHNAN, V.; CHELLAPPAN, K. P.; BALASUBRAMANIAN, T. Restoration of saline land by halophytes for Indian soils. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 39, p. 2661-2664, 2007.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. *Tópicos em Ciência do Solo*, volume 5. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 49-134, 2007.
- RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. da G. B. de. F. SAMPAIO, F. de M. T. S. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. *Ciência Agrotécnica*, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007.
- RIBEIRO, M. R.; BARROS, M. F. C.; FREIRE, M. B. G. dos S. Química dos solos salinos e sódicos. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. *Química e mineralogia do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, p.449- 484, 2009.
- RIBEIRO, M. R.; FREIRE, F. J.; MONTENEGRO, A. A. A. Solos halomórficos no Brasil: ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável. In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ V., V. H. (eds) *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p.165-208, 2003.
- RIBEIRO, M. R. Origem e classificação dos solos afetados por sais. In: GHEYI, R.H.; DIAS, N.S.; LACERDA, C.F. *Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados*. Fortaleza: INCT Sal, 2010. 472p.
- RÍOS, L. V. C. Salinidad: Homeostasis iónica y acuaporinas. *Centro de Investigaciones del Hombre en el Desierto - IDESIA*. 2004. p. 61-68.
- ROCHA, I. M. A.; SILVEIRA, J. A. G. Acumulação de íons e metabolismo de N em cajueiro anão em meio salino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, n. 2, p.125-133, 2007.
- RODRIGUEZ-NAVARRO, A. Potassium transport in fungi and plants. *Biochemistry Biophysiol Acta*. v.1469, p.1-30, 2000.
- ROMEIRO, S.; LAGÔA, A. M. M. A.; FURLANI, P. R.; ABREU, C. A. de; PEREIRA, B. F. F. Absorção de chumbo e potencial de fitorremediação de *Canavalia ensiformes* L. *Bragantia*, v.66, n.2, p.327-334, 2007.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.297-300, 2005. (NOTA).

RUIZ, H. A.; SAMPAIO, R. A.; OLIVEIRA, M. de; FERREIRA, P. A. Características físicas de solos salino-sódicos submetidos a parcelamento da lâmina de lixiviação. *Jornal Soil Science Plant Nutrition*, v. 6, n. 3, p. 1-12, 2006.

RUIZ, H. A.; SAMPAIO, R. A; OLIVEIRA, M. de ; VENEGAS, V. H. A. Características químicas de solos salino-sódicos submetidos a parcelamento da lâmina de lixiviação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, n.11, p.1119-1126, 2004.

SANTOS, J. B., PROCÓPIO, S. O., SILVA, A. A., PIRES, F. R., RIBEIRO JÚNIOR, SANTOS, E. A., FERREIRA, L. R., Fitorremediação do herbicida Trifloxysulfuron Sodium. *Planta Daninha*, v.22, n.2, p.323-330, 2004.

SANTOS, K. C. F.; SILVA, M. S. L. da, SILVA, L. E. da, MIRANDA, M. A.; FREIRE, M. B. G. dos S. Atividade biológica em solo salino sódico saturado por água sob cultivo de *Atriplex nummularia*. *Revista Ciência Agronômica*, v.42, n.3, p.619-627, 2011.

SANTOS, M. de F. G. dos; OLIVEIRA, F. A. de; CAVALCANTE, L. I. F.; MEDEIROS, J. F. de; SOUZA, C. C. de. Solo sódico tratado com gesso agrícola, composto de lixo urbano e vinhaça. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, n.3, p.307-313, 2005.

SANTOS, R. V. dos; CAVALCANTE, L. F.; VITAL, A. de. F. M. Interações salinidade-fertilidade do solo. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. Manejo da salinidade na agricultura. Fortaleza, INCT Sal, 2010. p. 472.

SHARMA, M. L. Aspects of salinity and water relations of Australian Chenopodes. In: Sen, D. N.; Rajpurohit, K. S. (ed.). Contributions to the ecology of halophytes. Hague: W. Junk, 1982. p.155-175.

SILVA, C. M. M. de S; VIEIRA, R. F.; OLIVEIRA, P. R. Salinidade, sodicidade e propriedades microbiológicas de Argissolo cultivado com erva-sal e irrigado com rejeito salino. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.43, n.10, p.1389-1396. 2008.

SILVA, E. N. da; SILVEIRA, J. A. G.; FERNANDES, C. R. R.; DUTRA, A. T. B.; ARAGÃ, R. M. de. Acúmulo de íons e crescimento de pinhão-mansô sob diferentes níveis de salinidade. *Revista Ciência Agronômica*, v. 40, n. 2, p.240-246, 2009.

- SILVA, F. C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. Brasília, DF: EMBRAPA Informação tecnológica, 2009. 627p.
- SILVEIRA, J. A. G.; SILVA, S. L. F.; SILVA, E. N.; VIEGAS, R. A. Mecanismos biomoleculares envolvidos com a resistência ao estresse salino em plantas. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. Manejo da salinidade na agricultura. Fortaleza, INCT Sal, 2010. p. 472.
- SILVEIRA, J. A. G.; VIÉGAS, R. A.; ROCHA, I. M. A.; MOREIRA, A. C. O. M.; MOREIRA, R. A.; OLIVEIRA, J. T. A. Proline accumulation and glutamine sintetase activity are increased by salt induced proteolysis in cashew leaves. *Journal of Plant Physiology*, v.160, n.1, p.115-123, 2003.
- SOUTO, J. C. R.; ARAÚJO, G. G. L.; SILVA, D. S.; PORTO, E. R.; TURCO, S. H. N.; MEDEIROS, A. N. Desempenho produtivo de ovinos alimentados com dietas contendo níveis crescentes de feno de erva sal (*Atriplex nummularia* Lindl.). *Revista Ciência Agronômica*, v. 36, n. 3, p. 376-381, 2005.
- SOUZA, E. R. de. Fitorremediação de Neossolo Flúvico sódico salino de Pernambuco com *Atriplex nummularia*. Recife, UFRPE, 75 p. 2010. (Tese de doutorado).
- SOUZA, E. R. de; FREIRE, M. B. G. DOS S; NASCIMENTO, C. W. A. do; MONTENEGRO, A. A. DE A. FREIRE, F. J.; MELO, H. F. de. Fitoextração de sais pela *Atriplex nummularia* lindl. sob estresse hídrico em solo salino sódico. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n. 5, p.477–483, 2011.
- SPERA, S. T.; DENARDIN, J. E., ESCOSTEGUY, P. A. V., SANTOS, H. P. dos; FIGUEROA, E. A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2613-2620, 2008. Número Especial.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal*. Artmed, ed. 3, 2006. 719 p.
- THOMAS, G. W. Exchangeable cations. In: Page, A. L. (ed). *Methods of soil analysis. Part-2 chemical methods*. Madison: American Society of Agronomy, 1982, p.159-165.
- UNITED STATES SALINITY LABORATORY – USSL STAFF. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington, U.S. Department of Agriculture, 1954. 160p. (Handbook 60).

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV. SAEG 9.1: Sistema de Análises Estatística. Viçosa, MG: Fundação Arthur Bernardes, 2007. (CD-ROM).

VITAL, A. F. M.; SANTOS, R. V.; CAVALCANTE, L. F.; SANTO, J. S. Comportamento de atributos químicos de um solo salino-sódico tratado com gesso agrícola e fósforo. Revista Brasileira de engenharia Agrícola e Ambiental, v.9. n.1, 30-36, 2005.

VITTI, G. C.; HOLANDA, J. S.; CERQUEIRA LUZ, P. H.; HERNANDEZ, F. B. T.; BOARETTO, A. E. & PENTEADO, S. R. Fertirrigação, condições e manejo. In: Fertilizantes: insumo básico para agricultura e combate à fome. REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21., Petrolina, 1995. Anais. Petrolina, Embrapa-CPATSA/Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 1995. p. 195-271.

WILLADINO, L. G.; CÂMARA, T. R. Aspectos fisiológicos do estresse salino em plantas. In: NOGUEIRA, R. J. M. C., ARAÚJO, E. L., WILLADINO, L. G., CAVALCANTE, U. M. T. (Eds.). Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas. UFRPE, Imprensa Universitária, p. 118–126, 2005.

WILLADINO, L.; CÂMARA, T. R. Tolerância das plantas à salinidade: aspectos fisiológicos e bioquímicos. Enciclopédia Biosfera, v. 6, n. 11, p. 1-23, 2010.

YOKOI, S.; BRESSAN, R. A.; HASEGAWA, P. M. Salt stress tolerance of plants. JIRCAS Working Report, p. 25-33, 2002.

ZHU, J. K. Plant salt tolerance. Trends in Plant Science, v. 6, p. 66-71, 2001.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fitorremediação com *Atriplex nummularia* Lindl é uma técnica eficiente na melhoria de solos afetados por sais do Sertão de Pernambuco, podendo ser utilizada sem dificuldades na recuperação destes solos degradados no Estado. A fitorremediação pode se tornar uma técnica viável na recuperação de solos salinos, sódicos ou salino-sódicos, desde que utilizada de maneira racional, retirando-se o material vegetal produzido da área para evitar o retorno dos sais ao solo. Constitui, também, uma alternativa acessível para pequenos agricultores, que deve ser reforçada em uma troca de informações entre órgãos de pesquisa e agricultores. Salienta-se ainda a importância do conhecimento da tecnologia atrelada à técnica, bem como das habilidades e potencialidades das espécies empregadas na fitorremediação. Nesse contexto, os aspectos do processo de fitorremediação seriam elucidados de forma mais eficaz para a pesquisa de recuperação de solos degradados por sais, assim como para a sustentabilidade e conservação da agricultura e do ambiente.