

**MÁRCIO FLÉQUISSON ALVES MIRANDA**

**DIAGNÓSTICO E RECUPERAÇÃO DE SOLOS AFETADOS POR SAIS EM  
PERÍMETRO IRRIGADO DO SERTÃO DE PERNAMBUCO**

**RECIFE  
PERNAMBUCO - BRASIL  
2013**

**MÁRCIO FLÉQUISSON ALVES MIRANDA**

**DIAGNÓSTICO E RECUPERAÇÃO DE SOLOS AFETADOS POR SAIS EM  
PERÍMETRO IRRIGADO DO SERTÃO DE PERNAMBUCO**

Tese 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 Doutor em Ciência do solo.

**RECIFE  
PERNAMBUCO - BRASIL  
2013**

Ficha catalográfica

M672d Miranda, Márcio Fléquisson Alves  
Diagnóstico e recuperação de solos afetados por sais em  
perímetro irrigado do sertão de Pernambuco / Márcio  
Fléquisson Alves Miranda – Recife, 2013.  
102 f. : il.

Orientadora: Maria Betânia Galvão dos Santos Freire.  
Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade  
Federal Rural de Pernambuco, Departamento de  
Agronomia, Recife, 2013.  
Referências.

1. Semiárido 2. Perímetro irrigado 3. Solos afetados por  
sais 4. Compostos químicos e orgânicos 5. Fitorremediação  
I. Freire, Maria Betânia Galvão dos Santos, orientadora  
II. Título

CDD 631.4

**MÁRCIO FLÉQUISSON ALVES MIRANDA**

**DIAGNÓSTICO E RECUPERAÇÃO DE SOLOS AFETADOS POR SAIS EM  
PERÍMETRO IRRIGADO DO SERTÃO DE PERNAMBUCO**

Tese 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 Doutor em Ciência do solo.

Tese aprovada no dia 20 Fevereiro de 2013.

Orientadora:

---

Dr<sup>a</sup> Maria Betânia Galvão dos Santos Freire  
(DEPA/UFRPE)

Examinadores:

---

Dr. André Julio do Amaral  
(EMBRAPA/SOLOS)

---

Dr. Bradford Paul Wilcox  
(TEXAS A & M UNIVERSITY)

---

Dr. Brivaldo Gomes de Almeida  
(DEPA/UFRPE)

---

Dr<sup>a</sup>. Izabel Cristina de Luna Galindo  
(DEPA/UFRPE)

A Deus, fonte da vida e do amor.

Aos meus pais, Reguinier e Nanete, pelo amor, carinho e incentivo.

À minha querida esposa, Giselle Barros, pelo amor e carinho, estando sempre ao meu lado, apoiando e ajudando-me a vencer mais uma etapa da vida.

Aos meus queridos irmãos, Cristina, Safira e Marcelo pelo carinho e incentivo.

Aos meus sobrinhos.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que nos dá força para enfrentar todos os nossos desafios;

Ao povo brasileiro, que, por meio dos seus impostos, custeou toda a minha formação acadêmica;

Aos meus pais, Reguinier Martins de Miranda e Nanete Alves Miranda, a quem devo tudo que venho conquistando na vida;

À minha esposa, Giselle Barros, por todo incentivo e apoio durante meus estudos e pela compreensão de minha ausência durante a realização dos trabalhos em campo e laboratório;

Aos meus irmãos, Cristina, Safira e Marcelo, amigos de todas as horas;

Ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, pela oportunidade concedida;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo;

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, pela amizade, confiança, paciência e apoio incondicional durante a realização deste trabalho;

Ao prof. Brivaldo Gomes de Almeida pela co-orientação e pelo valioso auxílio durante a realização dos trabalhos em campo e laboratório;

Aos professores Izabel Cristina de Luna Galindo, Bradford Paul Wilcox e ao pesquisador André Júlio do Amaral pela participação na defesa desta tese e pelas críticas e sugestões para melhoria deste trabalho;

Aos estimados alunos de graduação, pós-graduação, estagiários, pelo companheirismo e amizade que muito me ajudaram e a quem eu devo muito, principalmente pelo valioso apoio nas coletas de solo e análises laboratoriais, Luis Eduardo da Silva, Emanuel Ernandes (Madruga), Marcelo Miranda, Rômulo José, Anderson, Luis Guilherme, Wagner Rogério, Israel Venismare, Karen Cristina, Juliana, Zilândia e Levy;

A Patrícia Ribeiro e Luis Guilherme, pela amizade, companheirismo e pelo valioso auxílio nas análises estatísticas;

A Maria do Socorro Santana e Josué pelo apoio na secretaria da pós-graduação;

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela participação em minha formação;

A todos os colegas da Pós-Graduação da UFRPE pelos momentos compartilhados;

Aos amigos Rosival Barros, Geysy Barros, Nair, Jurandy Lucas, Lucy, Fau, Henrique, Claudyane, Jeime Nunes, Jailson Cunha, Leandro do vale pelo apoio;

Aos meus sogros Durval de Andrade e Rosilda Barros pelo indiscutível apoio prestado;

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

## BIOGRAFIA

MÁRCIO FLÉQUISSON ALVES MIRANDA, filho de Nanete Alves Miranda e Reguinier Martins de Miranda, nasceu em 16 de março de 1980, em Presidente Dutra, Bahia.

Em 2001 iniciou o curso de Engenharia Agrônômica na Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife – PE, graduando-se em 2006. Durante o período de agosto de 2003 a julho de 2006 desenvolveu trabalhos de pesquisa na área de solos como Bolsista de Iniciação Científica/CNPq.

Em março de 2007, ingressou no programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, em nível de Mestrado, pela Universidade Federal de Viçosa, em Minas Gerais, onde concluiu o curso em março de 2009. Logo em seguida, ingressou no programa de Pós-Graduação da Universidade Federal Rural de Pernambuco, recebendo em fevereiro de 2013 o título de Doutor em Ciência do Solo.



## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	17
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1. Solos afetados por sais em perímetros irrigados.....	19
2.2. Recuperação de solos afetados por sais.....	22
2.2.1. Aporte de Matéria orgânica .....	24
2.2.2. Gesso.....	25
2.2.3. Polímeros.....	26
2.2.4. Fitorremediação com <i>Atriplex nummularia</i> Lindl.....	28
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1. Avaliação da qualidade dos solos do Perímetro Irrigado de Custódia.....	30
3.1.1. Caracterização do local de estudo.....	30
3.1.2. Amostragem dos solos.....	31
3.1.3. Atributos químicos dos solos.....	32
3.1.4. Atributos físicos dos solos.....	33
3.1.4.1. Análise granulométrica.....	33
3.1.4.2. Argila dispersa em água.....	33
3.1.4.3. Densidade do solo e das suas partículas sólidas.....	33
3.2. Avaliação da qualidade das águas utilizadas no Perímetro Irrigado.....	33
3.3. Estatística descritiva e análise de agrupamento.....	33
3.4. Experimento de recuperação de solo.....	34
3.4.1. Local de instalação do experimento em campo.....	34
3.4.2. Delineamento experimental, Tratamentos e amostragem de solo....	35
3.4.3. Atributos químicos e físicos.....	36
3.4.3.1. Condutividade hidráulica de solo em meio saturado.....	36
3.4.3.2. Porosidade total, macro e microporosidade.....	37
3.4.3.3. Resistência do solo à penetração de raízes.....	37
3.4.3.4. Índice de dispersão.....	37
3.4.4. Análises estatísticas.....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	39
4.1. Atributos químicos dos solos do Perímetro Irrigado.....	39
4.1.1. Estatística descritiva dos atributos químicos dos solos .....	39
4.1.2. Análise de agrupamento dos atributos químicos do solo.....	48
4.2. Atributos físicos dos solos do Perímetro Irrigado.....	53
4.2.1. Estatística descritiva dos atributos físicos dos solos .....	53
4.3. Atributos químicos da água utilizada no perímetro irrigado .....	57
4.3.1. Estatística descritiva dos atributos químicos da água .....	57
4.4. Atributos químicos do solo do experimento em campo.....	60
4.5. Atributos físicos do solo do experimento em campo.....	79
5. CONCLUSÕES.....	88
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Médias de precipitação mensal registradas no município de Custódia-PE durante a condução do experimento.....	31
Figura 2. Imagem de satélite com a localização dos pontos de amostragem no Perímetro Irrigado de Custódia, Pernambuco.....	32
Figura 3. Dendrograma resultante da análise de agrupamento dos valores de pH, CE, RAS e PST dos 55 lotes do Perímetro Irrigado na coleta de Julho de 2009 na profundidade de 30-60 cm, utilizando a distância euclidiana como coeficiente de similaridade e o algoritmo de WARD como método de agrupamento.....	49
Figura 4. Dendrograma resultante da análise de agrupamento dos valores de pH, CE, RAS e PST dos 55 lotes do Perímetro Irrigado na coleta de Janeiro de 2010 na profundidade de 30-60 cm, utilizando a distância euclidiana como coeficiente de similaridade e o algoritmo de WARD como método de agrupamento.....	50
Figura 5. Dendrograma resultante da análise de agrupamento dos valores de pH, CE, RAS e PST dos 55 lotes do Perímetro Irrigado na coleta de Julho de 2010 na profundidade de 30-60 cm, utilizando a distância euclidiana como coeficiente de similaridade e o algoritmo de WARD como método de agrupamento.....	50
Figura 6. Dendrograma resultante da análise de agrupamento dos valores de pH, CE, RAS e PST dos 55 lotes do Perímetro Irrigado na coleta de Janeiro de 2011 na profundidade de 30-60 cm, utilizando a distância euclidiana como coeficiente de similaridade e o algoritmo de WARD como método de agrupamento.....	51
Figura 7. Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm em função dos tratamentos e da época de coleta (0, 6, 12 e 18 meses). Médias seguidas de letras iguais na mesma profundidade não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, para cada tratamento.....	67
Figura 8. Sódio solúvel do extrato de saturação do solo nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm em função dos tratamentos e da época de coleta (0, 6, 12 e 18 meses). Médias seguidas de letras iguais na mesma profundidade não	

diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, para cada tratamento.....	69
Figura 9. Relação de adsorção de sódio do extrato de saturação do solo nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm em função dos tratamentos e da época de coleta (0, 6, 12 e 18 meses). Médias seguidas de letras iguais na mesma profundidade não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, para cada tratamento.....	71
Figura 10. Sódio trocável do solo nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm em função dos tratamentos e da época de coleta (0, 6, 12 e 18 meses). Médias seguidas de letras iguais na mesma profundidade não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, para cada tratamento e profundidade.....	76
Figura 11. Percentagem de sódio trocável do solo nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm em função dos tratamentos e da época de coleta (0, 6, 12 e 18 meses). Médias seguidas de letras iguais na mesma profundidade não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, para cada tratamento e profundidade.....	77
Figura 12. Condutividade hidráulica em meio saturado do solo aos 0 e 18 meses nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm em função dos tratamentos aplicados.....	79
Figura 13. Macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo aos 0 e 18 meses nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm em função dos tratamentos aplicados.....	82
Figura 14. Resistência a penetração do solo aos 0 e 18 meses nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm em função dos tratamentos aplicados.....	84
Figura 15. Teores de argila dispersa em água e índice de dispersão aos 0 e 18 meses nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm em função dos tratamentos aplicados.....	85

## LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Medidas estatísticas descritivas e valores médios de pH do solo, pH do extrato de saturação, condutividade elétrica, íons solúveis e relação de adsorção de sódio no extrato de saturação dos solos nos 55 lotes do Perímetro Irrigado de Custódia (PE), em função da profundidade e da época de coleta.....	40
Tabela 2. Medidas estatísticas descritivas e valores médios dos teores de cátions trocáveis, capacidade de troca de cátions, percentagem de sódio trocável e carbono orgânico total dos solos nos 55 lotes do Perímetro Irrigado de Custódia (PE), em função da profundidade e da época de coleta.....	46
Tabela 3. Valores médios de pH, condutividade elétrica do extrato de saturação, relação de adsorção de sódio e percentagem de sódio trocável dos grupos formados na análise de agrupamento na profundidade de 30-60 cm nas quatro coletas realizadas.....	52
Tabela 4. Medidas estatísticas descritivas dos atributos físicos dos solos nos 55 lotes do Perímetro Irrigado de Custódia (PE), em função da profundidade dos solos.....	55
Tabela 5. Medidas estatísticas descritivas dos atributos químicos das águas coletadas no Perímetro Irrigado de Custódia (PE), em função da época de coleta.....	58
Tabela 6. Valores médios de pH do solo, pH do extrato de saturação, condutividade elétrica, íons solúveis e relação de adsorção de sódio no extrato de saturação dos solos nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm em função dos tratamentos e do período de coleta do solo.....	61
Tabela 7. Valores médios dos teores de cátions trocáveis, capacidade de troca de cátions, percentagem de sódio trocável e carbono orgânico total dos solos nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm em função dos tratamentos e do período de coleta do solo.....	73
Tabela 8. Níveis de significância para a condutividade hidráulica em meio saturado, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo, resistência à penetração, argila dispersa em água e índice de dispersão em função dos tratamentos, da profundidade do solo e do tempo de coleta.....	80

MIRANDA, MÁRCIO FLÉQUISSON ALVES; Doutor em Ciência do Solo. Universidade Federal Rural de Pernambuco, fevereiro de 2013. **Diagnóstico e recuperação de solos afetados por sais em Perímetro Irrigado do Sertão de Pernambuco**. Orientadora: Maria Betânia Galvão dos Santos Freire. Co-orientador: Brivaldo Gomes de Almeida.

## RESUMO

Na Região Nordeste do Brasil, nas últimas décadas, com o incremento da irrigação em perímetros irrigados, muitas vezes com manejo inadequado às condições locais, os processos de salinização e sodificação de solos têm se intensificado, promovendo a degradação e abandono de extensas áreas anteriormente produtivas. Assim, realizou-se o levantamento da situação de degradação do Perímetro Irrigado de Custódia, no Sertão de Pernambuco, onde foram identificadas áreas com problemas de excesso de sais, seguindo-se de montagem de experimento para recuperação de uma dessas áreas, através da aplicação de compostos orgânicos e químicos, além da técnica da fitorremediação com *Atriplex nummularia*. Para isso, foram realizadas amostragens de solos em todos os 55 lotes que compõem o perímetro nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm para a caracterização física e química dos solos, além das análises químicas das águas utilizadas no perímetro nos períodos de Julho/2009, Janeiro/2010, Julho/2010 e Janeiro/2011. Após seleção de área degradada do perímetro, foi montado experimento de recuperação do solo testando-se os tratamentos: 1) plantio de *Atriplex nummularia* Lindl, 2) aplicação de esterco bovino, 3) esterco ovino, 4) polímero, 5) gesso e 6) controle (testemunha). Foram realizadas quatro amostragens, sendo a primeira no momento da montagem do experimento (Outubro de 2009), aos seis (Abril de 2010), aos doze (Outubro de 2010) e aos dezoito meses (Abril de 2011). As amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm de profundidade para realização das análises químicas. Para a realização das análises físicas do solo coletaram-se amostras de solo na primeira coleta (Outubro de 2009) e na última (Abril de 2011) nas profundidades de 0-10 cm e 10-30 cm. Foram monitorados os atributos do solo com a aplicação dos tratamentos em função do tempo. Os solos do Perímetro Irrigado de Custódia encontram-se em processo de degradação e precisam ter suas propriedades monitoradas ao longo do tempo

para evitar sua evolução. Entre os cátions avaliados, o  $\text{Na}^+$  solúvel e trocável foi o que esteve em concentrações mais elevadas, seguido pelo  $\text{Cl}^-$  e pela variável RAS, além do aumento da PST em profundidade. A técnica da fitorremediação foi efetiva na melhoria da qualidade dos solos estudados e a aplicação do esterco ovino e do polímero a base de poliacrilamida também atuaram positivamente na melhoria da qualidade química e física do solo.

MIRANDA, MÁRCIO FLÉQUISSON ALVES; D.Sc. Universidade Federal Rural de Pernambuco, february of 2013. **Diagnosis and recovery of soils affected by salts in Irrigated Perimeter of Sertão in Pernambuco.** Advisor: Maria Betânia Galvão dos Santos Freire. Co-advisor: Brivaldo Gomes de Almeida.

## ABSTRACT

In Northeastern Brazil, in recent decades, with the increase of irrigation using in irrigated perimeters, often with inadequate management to local conditions, the soil salinization and sodification processes have intensified, promoting degradation and abandonment of large areas previously productive. Thus, we carried out a field survey to investigate the soil degradation in irrigated perimeter situated in the municipality of Custodia, semiarid region in Pernambuco, Brazil. Firstly were identified areas with degraded soils by salts excess, and also was done the experiment assembly with the intent to recover those areas through the application of organic and chemicals compounds, besides the technique of phytoremediation with *Atriplex nummularia*. For that, soil samples were taken in all 55 plots that make up the perimeter in the 0-10, 10-30 and 30-60 cm layers for the soils physical and chemical characterization, and chemical analyzes of the water used on the perimeter during periods of July/2009, January/2010, July/2010 and January/2011. After the selection of the degraded area into the irrigated perimeter, was mounted an experiment to recover the degraded soil by the evaluation of the treatments: 1) planting of *Atriplex nummularia* Lindl, 2) application of bovine manure, 3) sheep manure, 4) polymer, 5) gypsum and 6) control (witness). Four samples were taken, the first being at the same time of the experiment assembly (October 2009). After that, three more samples were taken, at six (April 2010), twelve (October 2010) and eighteen months (April 2011) after experiment assembly. Soil samples were collected at 0-10, 10-30 and 30-60 cm depth for the chemical analyzes. To evaluate the physical properties, soil samples were collected in the first (October 2009) and in the last (April 2011) collection at 0-10 and 10-30 cm layers. Were monitored the soil attributes in relation to treatment application with respect to time. The soils of the irrigated perimeter from Custódia are in the process of degradation and need to have their properties monitored over time to prevent its development. Among the cations evaluated, soluble and

exchangeable  $\text{Na}^+$  was what was in higher concentrations, followed by the  $\text{Cl}^-$  and by the RAS variable, besides increasing the PST in depth. The phytoremediation technique was effective in improving the soils quality and the application of sheep manure and polyacrylamide based polymer also acted positively in improving the quality of soil chemistry and physics.



## 1. INTRODUÇÃO

O fornecimento de sais pelas águas de irrigação ou sua solubilização a partir dos minerais componentes das rochas, pode proporcionar acúmulo de cátions e ânions que comprometem a capacidade produtiva dos solos, tornando-os inaptos para a agricultura. Assim, a salinidade e a sodicidade de solos têm-se caracterizado como problemas ambientais mundialmente reconhecidos, degradando não apenas as áreas causadoras da degradação, como também áreas vizinhas que recebem a contribuição dos sais lançados ao ambiente.

Inúmeros fatores podem contribuir para a formação de solos afetados por sais, desde que todos esses fatores estejam sempre relacionados a condições climáticas onde os índices de evapotranspiração superam os de precipitação (condição típica em regiões de clima árido e semiárido), bem como um deficiente sistema de drenagem. Alguns solos, sob tais condições, tendem a ser mais propensos ao fenômeno da salinização, e esta susceptibilidade maior ou menor, por parte desses solos, irá depender fortemente das suas características físicas, químicas e mineralógicas.

As áreas afetadas por sais ocorrem em importantes extensões no mundo, principalmente em regiões de climas áridos e semiáridos, onde a irrigação é fundamental para uma agricultura bem sucedida. O acréscimo do conteúdo de sais solúveis no solo influencia no comportamento das culturas de diversas maneiras, por meio de mudanças nas proporções de  $\text{Na}^+$  trocável, na reação dos solos, em suas propriedades físicas, no potencial osmótico da solução do solo e nos efeitos tóxicos de íons específicos. Estas mudanças influenciam na atividade das raízes das plantas e dos microorganismos do solo, conseqüentemente, na produtividade das culturas (Cavalcante et al., 2010)

Estes problemas vêm se intensificando especialmente nos projetos de irrigação, devido ao manejo inadequado da técnica, o que reflete na redução da produtividade dos cultivos. A área total de solos afetados por sais no mundo de acordo com a FAO (2000), incluindo os solos salinos e sódicos é de 831 milhões de hectares, sendo 397 milhões de solos salinos e 434 milhões de solos sódicos.

Quanto ao problema da salinidade no Brasil, destaca-se o Sertão da Região Nordeste, no entanto, outras áreas também são afetadas, como alguns

locais na Região Amazônica e no Norte de Minas Gerais. Entretanto, a maior representatividade dos solos salinizados brasileiros encontra-se no Nordeste, pela sua condição climática. Nesta região do Brasil, a área explorada com irrigação ainda é pequena, chegando a aproximadamente 663.672 ha, mas existe potencial para chegar a 1.304.000 ha (Christofidis, 2001). Como a irrigação é apontada como uma das alternativas para o desenvolvimento socioeconômico das regiões semiáridas, ela deve ser racionalmente manejada, a fim de evitar problemas de excesso de sais nos solos e de degradação dos recursos hídricos e edáficos, uma vez que as condições climáticas dessas regiões são favoráveis para a ocorrência de salinização dos solos (Medeiros et al., 2008).

Desta forma, é preciso conhecer as áreas degradadas pela salinidade e sodicidade dos solos, as causas que desencadearam os processos de degradação e desenvolver técnicas mais adequadas às condições do Nordeste do Brasil, possibilitando minimizar o avanço da degradação e melhorando as propriedades dos solos para o cultivo de culturas de interesse agrícola.

Este trabalho teve como objetivo Diagnosticar e recuperar áreas afetadas por sais no Perímetro Irrigado de Custódia, no Sertão de Pernambuco, além de avaliar a possibilidade de uso da alternativa de manejo dos solos afetados por sais por fitoextração com Atriplex ou por uso de compostos orgânicos e químicos.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Solos afetados por sais em perímetros irrigados**

O acelerado crescimento populacional mundial a cada dia aumenta a demanda por alimentos. E, para atender às necessidades deste crescente consumo, o setor agrícola impulsiona cada vez mais a produção de alimentos. Com isso, a irrigação tornou-se uma ferramenta bastante atrativa, pois permitiu aumentar as áreas agricultáveis em todo o mundo, inclusive tornando produtivas as regiões áridas e semiáridas (Medeiros et al., 2010).

Ambientes de clima árido e semiárido, caracterizados por baixas precipitações e elevadas taxas de evapotranspiração potencial, frágeis pelas poucas reservas hídricas mantedoras da vida animal e vegetal, não poderiam escapar das agressões ambientais que comprometem a sustentabilidade dos ecossistemas. Para possibilitar a produção agropecuária nestes ambientes em todo o mundo, tem-se disseminado a técnica da irrigação, baseada no princípio de fornecimento da necessidade hídrica para produção vegetal, que forneceria alimento para consumo animal e humano. Entretanto, esta técnica, quando mal manejada, pode acarretar problemas ambientais imensuráveis, como degradação dos recursos solo e água, tornando-os impróprios para uso agrícola.

A irrigação é uma técnica milenar, que tem como objetivo fornecer a quantidade de água adequada as culturas, para que estas expressem ao máximo seu potencial de produção. Com o uso desta técnica, regiões anteriormente impróprias à produção agrícola tornaram-se altamente produtivas em alimentos, tendo como exemplo as regiões áridas e semiáridas de países como Israel, Espanha, Estados Unidos e Brasil. Na região semiárida do Brasil, os municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, que se destacam na agricultura irrigada, tiveram seu desenvolvimento impulsionado pelo uso desta técnica (Basso et al., 2010).

Diversos são os exemplos de processos de salinização em perímetros irrigados, em consequência da irrigação inadequada, conforme citado por Ribeiro et al. (2003). De acordo com Batista et al. (1998), a salinização decorrente da irrigação tem sido observada em regiões com precipitação pluviométrica anual de até 1.000 mm, principalmente em solos rasos e de

drenagem deficiente. Além da reduzida precipitação pluviométrica, o elevado déficit hídrico resultante de altas taxas de evapotranspiração contribui para o processo de acúmulo de sais. Este déficit hídrico, segundo Ribeiro et al. (2003), impede que as precipitações promovam lavagens completas e frequentes dos perfis de solos irrigados, fazendo com que os íons  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$  em solução tendam a permanecer na zona radicular.

Na região Nordeste do Brasil, as águas utilizadas nas irrigações são provenientes de rios, açudes e poços tubulares, apresentando valores de condutividade elétrica (CE) geralmente abaixo de  $0,75 \text{ dS m}^{-1}$ , com exceção dos poços tubulares, os quais podem ter água com baixa qualidade para a irrigação. Sob condições adequadas de manejo, estas águas são consideradas de boa qualidade e não apresentam maiores problemas para irrigação. Porém, em decorrência do inadequado balanço de sais, geralmente verificado por falta de drenagem, observa-se uma gradativa salinização do perfil do solo irrigado e um progressivo aumento das áreas com problemas (Cordeiro, 2001). Neste caso, o problema ocorre devido à ascensão do lençol freático nas áreas dos perímetros irrigados, que com a elevada demanda evapotranspirométrica da região, propiciam um fluxo ascendente a partir do lençol freático e, conseqüentemente, uma maior concentração de sais na superfície do solo (Bernardo et al., 2006).

Alguns problemas têm surgido devido ao aumento das áreas irrigadas, dentre eles destaca-se a salinização dos solos. Isto ocorre devido à presença de sais dissolvidos na água de irrigação que, mesmo em baixas concentrações, podem ser incorporados ao solo, tornando-os salinos em poucos anos (Medeiros, 2001). Problemas relacionados ao excesso de sais e  $\text{Na}^+$  trocável podem ser intensificados pelo tipo de solo. Contudo, pode ocorrer em função da qualidade da água usada na irrigação, do seu manejo, da existência e do nível de drenagem natural e ou artificial do solo e da profundidade do lençol freático.

É comum o surgimento de salinidade nas áreas irrigadas provocada pela água de irrigação contendo concentrações elevadas de sais, decorrente de práticas de manejo que não visam à conservação da capacidade produtiva dos solos, de ausência de sistema de drenagem, de quantidade de água e de uso indiscriminado e excessivo de fertilizantes (Bernardo et al., 2006).

Um dos principais fatores associados à salinização dos solos é a qualidade da água de irrigação, principalmente por alterar a composição da solução do solo. Esta água pode conter de 100 a 4.000 kg de sal em cada 1.000 m<sup>3</sup>, sendo geralmente aplicada à razão de 10.000 a 15.000 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Neste caso, se a drenagem do solo for um fator limitante, aproximadamente de 1,0 a 60,0 Mg ha<sup>-1</sup> de sais serão adicionados nessas áreas irrigadas por ano (Macedo & Menino, 1998). Desta forma, é de suma importância o controle criterioso da água utilizada na irrigação, principalmente quando a CE é baixa e a RAS é mais elevada, o que pode favorecer a dispersão dos colóides.

Elevadas concentrações de sais solúveis na superfície ou nos horizontes superficiais do solo constituem um dos principais problemas na agricultura global, com graves consequências econômicas e sociais no mundo (Farifteh et al., 2007). Em nível mundial, mais de 800 milhões de hectares de terras são estimados como sendo áreas afetadas por sais, correspondendo a mais de 6% dos solos aráveis (Muns & Tester, 2008) e, apesar dos avanços tecnológicos, milhões de hectares continuam sendo salinizados, contribuindo severamente para a redução da produção agrícola mundial (Khan & Abdullah, 2003).

No Nordeste do Brasil, aproximadamente nove milhões de hectares de solos são afetados pela presença de sais (Fageria & Gheyi, 1997). Nestas áreas, havendo uma enorme carência de água, foram construídos açudes com elevadas capacidades de armazenamento de água e nas proximidades construídos perímetros irrigados. Na maioria destes, o uso inadequado da água, associado à falta de drenagem tem intensificado o problema da salinização dos solos. Segundo Gheyi (2000), na região Nordeste do Brasil aproximadamente 25% das áreas irrigadas encontram-se salinizadas.

Na região Nordeste do Brasil, a maior área afetada pelo excesso de sais no solo está localizada no oeste da Bahia (44% do total), seguido pelo estado do Ceará, com 25% da área total (Fageria & Gheyi, 1997). Nesses estados, a salinidade tem sido apontada como um dos principais fatores responsáveis pela diminuição no crescimento e na produtividade das culturas (Pereira et al., 2005).

São relatados problemas em diversos perímetros irrigados localizados nos estados do Nordeste. Alguns destes locais afetados por sais são citados por Macêdo (1988) em percentual de área: Custódia, PE – 97%; Ceraíma, BA – 32%, e Cachoeira II, PB, 30%. Suassuna & Audry (1993) descreveram que a

percentagem de áreas irrigadas com problemas de salinização nessas regiões é de, aproximadamente, 32%, podendo haver um aumento se não forem adotadas medidas preventivas. Aguiar Neto et al. (2006) indicaram problemas de salinização nos perímetros irrigados de Bebedouro e Nilo Coelho – PE, Tourão – BA, Morada Nova e Curu-Paraipava – CE e Jabiberi – SE, sendo que neste último 76,5% dos lotes estudados apresentaram-se salino-sodificados.

Os efeitos nocivos da salinidade são a toxicidade causada por elevada concentração de elementos químicos no solo como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  e  $\text{Cl}^-$ ; diminuição do potencial osmótico da água no solo, o que dificulta a absorção de água pelas culturas; e perda da estrutura do solo, quando ocorre especificamente o aumento da percentagem de sódio trocável (PST) acima de 15% (USSL Staff, 1954).

A escolha de áreas para compor perímetros irrigados nem sempre foi suficientemente embasada em critérios técnico-econômicos (Oliveira et al., 2002). Ainda de acordo com estes autores, este fato, associado à falta de habilidade de parte dos irrigantes no manejo da irrigação e às peculiaridades edafoclimáticas do Nordeste brasileiro, muito têm contribuído para o processo de degradação de solos da região.

O homem contribui expressivamente para o processo de salinização dos solos, tanto por meio do uso de águas salinas, como pela adoção de práticas inadequadas de manejo da irrigação e dos solos. Em torno de 76,3 milhões de hectares foram salinizados como consequência de atividades humanas de acordo com a Avaliação Mundial de Degradação do Solo por Indução Humana (GLASOD) conduzida pelo projeto GLASOD na década de 80. Segundo os dados do estudo, isto representa 3,9% dos 1.964,4 milhões de hectares afetados pela degradação antrópica do solo (Oldeman et al., 1991).

Uma vez degradados os solos, sua recuperação envolve o uso de muitos recursos, além de ser de difícil implementação, ressaltando-se a importância de um monitoramento contínuo de áreas irrigadas sob clima árido e semiárido para evitar a evolução da degradação.

## **2.2. Recuperação de solos afetados por sais**

Inúmeras são as técnicas utilizadas para a recuperação de solos afetados por sais e, dentre elas, a lavagem dos sais e a aplicação de

melhoradores químicos são consideradas fundamentais, pois atuam diretamente na eliminação ou correção dos problemas de salinidade e sodicidade. No entanto, existem técnicas auxiliares, tais como aração profunda, subsolagem e aplicação de resíduos orgânicos, entre outras, que têm a função não exatamente de recuperar os solos, mas de atuarem sobre algumas propriedades do solo, que tornam mais eficientes as técnicas fundamentais de recuperação (Cavalcante et al., 2010).

Para a recuperação de solos salinos é necessário promover a lixiviação dos sais solúveis presentes em elevadas concentrações. Para isso, aplicam-se lâminas excedentes em presença de sistemas de drenagem que possibilitem a saída dos sais do sistema. Esta técnica recomenda a aplicação de água em quantidade suficiente para dissolver e transportar os sais solúveis para o sistema de drenagem. O escoamento dos sais e da água dentro do perfil do solo é alterado por fatores como propriedades físicas do solo, condições climáticas, características das culturas e manejo da irrigação (Ribeiro et al., 2009). Contudo, quando a degradação envolve também a sodicidade, é necessário o uso de corretivos químicos que promovam o deslocamento do  $\text{Na}^+$  trocável do solo para sua posterior retirada pelo uso de lâminas de lixiviação e drenagem.

A recuperação de solos com problemas de sodicidade requer técnicas mais elaboradas de correção, que envolvem a aplicação de melhoradores ou corretivos químicos associados a lâminas de lixiviação e sistema de drenagem eficiente do solo. Nestes solos, o uso dos corretivos se faz necessário para deslocar o  $\text{Na}^+$  que está adsorvido na micela, mediante a adição de substâncias que contenham, principalmente, o elemento  $\text{Ca}^{2+}$ . Deste modo, os corretivos têm a finalidade de fornecer o  $\text{Ca}^{2+}$ , ou liberá-lo, quando presente no solo, para substituir o  $\text{Na}^+$  trocável, liberando-o para a solução do solo, de onde será lixiviado pela lavagem (Cavalcante et al., 2010). Neste processo básico ocorre a troca do  $\text{Na}^+$  adsorvido no complexo de troca pelo cátion proveniente do corretivo e, com aplicação de água, os sais solúveis de  $\text{Na}^+$  formados são lixiviados ao longo do perfil para profundidades abaixo da zona das raízes, sendo eliminados do sistema. Portanto, o objetivo principal da aplicação de corretivos é a redução da porcentagem de sódio trocável em solos sódicos.

O  $\text{Ca}^{2+}$ , mesmo estando presente em menor proporção em relação ao  $\text{Na}^+$ , consegue substituí-lo, pois o solo tem maior seletividade pelo  $\text{Ca}^{2+}$  do que

pelo  $\text{Na}^+$ , ou seja, o  $\text{Ca}^{2+}$  é atraído com maior força pelas partículas de argila. No entanto, se o  $\text{Na}^+$  substituído não for removido mediante o processo de lavagem, associada à drenagem, o solo pode tornar-se sódico. Isto indica a importância da drenagem na recuperação dos solos salino-sódicos e sódicos (Cavalcante et al., 2010). Desta forma, a correção de solos sódicos é, geralmente, mais difícil do que a de solos salinos. Inúmeros corretivos têm sido testados para reduzir o teor de  $\text{Na}^+$  trocável em solos sódicos e sua escolha dependerá das características do solo a ser corrigido, bem como da disponibilidade e do custo dos materiais (USSL Staff, 1954).

### **2.2.1. Aporte de Matéria orgânica**

Nas áreas onde no complexo de troca predomina o  $\text{Na}^+$  trocável, além de condicionadores ou melhoradores químicos, tem sido recomendada a incorporação de materiais orgânicos, tais como: esterco de curral, adubo verde, composto de lixo urbano e resíduo de destilarias para a melhoria da permeabilidade desses solos (Silva, 1978). Holanda et al. (1998) constataram que o esterco de curral foi benéfico na redução do  $\text{Na}^+$  trocável de um solo salino-sódico, principalmente quando associado à subsolagem e à gessagem. Gomes et al. (2000), verificaram que o uso de condicionadores orgânicos (esterco de curral, casca de arroz e vinhaça) reduziu os valores da percentagem de sódio trocável (PST) do solo.

A matéria orgânica, em geral, atua como agente floculante entre os componentes dos solos, interferindo positivamente em suas propriedades físicas e químicas, aumentando a condutividade hidráulica, a infiltração de água no solo e a CTC. Esse efeito também é esperado em solos afetados por sais. Os efeitos da matéria orgânica em solos salinos e sódicos podem ser considerados positivos, ao promover maior agregação das partículas do solo, com diminuição da dispersão promovida pelo  $\text{Na}^+$  (Freire & Freire, 2007).

Uma das funções dos microorganismos do solo é a decomposição da matéria orgânica, promovendo a liberação de uma série de compostos orgânicos que contribuem para a formação de agregados no solo, aumentando a sua permeabilidade. Durante o processo de decomposição da matéria orgânica, os microorganismos do solo liberam  $\text{CO}_2$ , o qual ao combinar com água forma ácido carbônico, que pode solubilizar sais de  $\text{Ca}^{2+}$  precipitados no



solo (Bulluck et al., 2002). Estas condições resultam na diminuição da percentagem de  $\text{Na}^+$  trocável do solo e aumenta a dinâmica da água no solo.

Os resíduos das culturas, quando são deixados sobre a superfície ou são incorporados à camada superficial dos solos, fazem com que melhore a estabilidade dos agregados dos mesmos, facilitando a infiltração e a permeabilidade da água nos solos sódicos e nos irrigados com águas de baixa salinidade ou de RAS elevada. O efeito dos resíduos é, no entanto, temporário, pelas elevadas taxas de decomposição, o que requer incorporações mais frequentes (Ayers & Westcot, 1999).

Para que a incorporação e os resultados sejam eficazes, necessita-se de grandes quantidades de compostos orgânicos. No caso de esterco, por exemplo, tem-se utilizado doses que variam de 40 a 400 t  $\text{ha}^{-1}$ . Para que as aplicações dos compostos orgânicos sejam eficientes, necessita-se de doses de 10 a 30% do volume do solo nos seus primeiros 15 cm (Ayers & Westcot, 1999).

Desta forma, a matéria orgânica pode ser considerada uma importante medida mitigadora em regiões de clima semiárido, podendo, inclusive, ser utilizada de forma preventiva, uma vez que sua aplicação traz inúmeros benefícios às propriedades dos solos cultivados. Além disso, seu custo e facilidade de aquisição nessas regiões, comparados aos corretivos químicos, podem ser outra grande vantagem para seu uso, principalmente para os pequenos agricultores.

### **2.2.2. Gesso**

Diversos corretivos inorgânicos podem ser utilizados na recuperação de solos com excesso de  $\text{Na}^+$  trocável, como gesso, enxofre, sulfato de alumínio, cloreto de cálcio e ácido sulfúrico; entretanto, o gesso é o produto mais comumente usado em razão do seu baixo custo e abundância com que é encontrado na maior parte do mundo (Melo et al., 2008). No território brasileiro, as principais reservas ocorrem associadas às bacias sedimentares, entre as quais a do Araripe, que abrange os estados do Piauí, Ceará e Pernambuco, sendo este o polo mais produtivo de gesso do País, denominado polo gesseiro do Araripe (Barros et al., 2004).

O gesso é um minério que ocorre abundantemente em todo o mundo e cuja solubilidade é cerca de  $2,04 \text{ g L}^{-1}$  a  $25^\circ\text{C}$ . Usualmente, ocorre na forma dihidratada ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), embora as formas semi-hidratada ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) e a anidra ( $\text{CaSO}_4$ ), sejam, também, encontradas naturalmente. O estado de Pernambuco ocupa o primeiro lugar na exploração de gesso de jazida do país, sendo responsável por aproximadamente 90% da produção nacional (Ribeiro et al., 2009). O gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), apesar da sua baixa solubilidade, é o corretivo químico mais utilizado como fonte de  $\text{Ca}^{2+}$  para substituir o  $\text{Na}^+$  trocável, em virtude do seu baixo preço, disponibilidade no mercado e fácil manuseio. Além disso, ele funciona como fonte de Ca e S para as plantas (Cavalcante et al., 2010).

A aplicação do gesso, além de melhorar as características químicas do solo, contribui para uma melhoria em suas características físicas, especialmente na estabilidade dos agregados, reduzindo conseqüentemente os valores de argila dispersa em água (Rosa Júnior et al., 2006). Em solos com problemas de excesso de sais, o gesso reduz o selamento superficial, contribuindo com o aumento da taxa de infiltração de água no solo, reduzindo, conseqüentemente, os teores de  $\text{Na}^+$  no complexo de troca.

Várias são as pesquisas no Brasil e em outros países envolvendo a aplicação do gesso na correção de solos sódicos e inúmeros tem sido os resultados satisfatórios nestas pesquisas. Em estudos para recuperação de solos afetados por sais na China, Suhayda et al. (1997) observaram melhorias na taxa de infiltração e na estabilidade de agregados de solos com problemas de sodicidade após a aplicação de gesso. No tratamento com gesso, a taxa de infiltração foi de  $8 \text{ cm min}^{-1}$ , enquanto que para o tratamento que não recebeu o corretivo a taxa de infiltração não excedeu a  $1 \text{ cm min}^{-1}$ . Desta forma verifica-se a efetividade do gesso na melhoria das condições de cultivo em solos sódicos.

### **2.2.3. Polímeros**

Polímeros também têm sido utilizados como condicionadores de solos e os à base de poliacrilamida são os que mais têm promovido melhoria das propriedades físicas de solos. No entanto, o uso desses condicionadores de solos é limitado pelo seu valor econômico, muitas vezes, mais relacionado com o transporte e os custos de aplicação de materiais mais volumosos do que com

o preço do material. Assim, a aplicação de condicionadores orgânicos e minerais na produção agrícola tem sido, em grande parte, limitada a alguns materiais como calcário, gesso, esterco etc. Por outro lado, os condicionadores sintéticos, apesar de maior eficácia por unidade de material, tem seu uso limitado por causa do maior custo do material e do seu transporte (Sojka et al., 2007).

O custo está diretamente relacionado com estratégias de uso e aplicação. Até o ano de 1990, os condicionadores eram usados estrategicamente para melhorar significativamente as propriedades físicas e químicas de parte do perfil do solo. Ou seja, o intuito era o de melhorar as condições de cultivo da lavoura, normalmente a uma profundidade de 10-15 cm ou até mesmo a uma profundidade de enraizamento de 30-45 cm, o que exigia a aplicação de grandes quantidades de condicionadores (Sojka et al., 2007). Com o advento dos condicionadores químicos poliméricos, mudou-se a logística dessa estratégia por causa da alta eficácia desses condicionadores.

Os polímeros são macromoléculas formadas pela repetição de muitas unidades químicas iguais, os *meros* ou unidades repetitivas. As massas molares dos polímeros podem ser da ordem de centenas de milhares de unidades de massa atômica (De Paoli, 2008). Um dos condicionadores de solos mais amplamente empregados entre os polímeros é a Poliacrilamida (PAM), formada a partir da polimerização de monômeros de acrilamida (Almeida, 2008).

Os polímeros podem ser classificados como neutros, catiônicos e aniônicos e estas cargas influenciarão na sua eficácia como condicionadores de solos (Helalia & Letey, 1988). Os PAMs aniônicos são preferidos para aplicações ambientais, devido a sua toxicidade extremamente baixa quando comparados às formas não iônicas ou catiônicas (Sojka et al., 2007), além de serem mais eficientes na melhoria da resistência de agregados à erosão do que os catiônicos (Levy et al., 1992).

Os PAMs catiônicos, apesar de serem eficientes flocculantes, são tóxicos ao meio ambiente e, desta forma, seu uso tem sido extremamente limitado (Barvenik, 1994). A densidade de carga e o peso molecular dos PAMs são considerados as duas propriedades mais importantes para a eficiência do polímero (Levy & Agassi, 1995). Neste caso, os polímeros aniônicos são os

que têm baixas densidades de cargas e altos pesos moleculares, e que têm sido mais usados em pesquisas de melhoria de qualidade de solos.

A eficiência dos polímeros também depende da forma como são aplicados. Eles podem ser aplicados no estado sólido diretamente na superfície do solo, ou aplicados nas camadas subsuperficiais, a qual tem se tornado a maior dificuldade para sua utilização na agricultura (Russell, 1988). Também podem ser aplicados no estado líquido, dissolvidos na água de irrigação, tanto por sulcos, quanto por aspersão, tendo efeito no aumento da infiltração e na diminuição da perda de solo (Madeira et al., 2000).

Pesquisas têm comprovado que o uso de polímeros de poliacrilamida tem melhorado a qualidade dos solos afetados por sais. Neste sentido, um dos trabalhos pioneiros foi o de Wallace et al. (1986), onde os autores apresentaram resultados que constatarem que o tratamento com esse polímero sintético aumentou a taxa de infiltração de água no solo e reduziu o Na<sup>+</sup> trocável em solos salino-alcálicos.

#### **2.2.4. Fitorremediação com *Atriplex nummularia* Lindl.**

Algumas pesquisas têm apontado a técnica da fitorremediação como alternativa de manejo de áreas degradadas pela salinização e sodificação, por meio do cultivo de plantas capazes de acumular os sais em excesso, retirando-os do solo. Para isso, é necessário utilizar espécies de plantas capazes não só de tolerar elevados níveis de sais, como também de produzir biomassa suficiente para extrair quantidades consideráveis dos sais (Freire et al., 2010).

Do ponto de vista de novas tecnologias que visam a reutilização de solos salinos e sódicos, tem-se apontado as halófitas, em especial o gênero *Atriplex*, nos planos de manejo e recuperação de solos degradados, especialmente por causa da presença do sal, nocivo para a maioria das plantas. Para Jordan et al. (2008), uma espécie de grande importância é a *Atriplex nummularia*, devido à adaptabilidade aos estresses abióticos salinidade e deficiência hídrica. As halófitas podem ser usadas em projetos de revegetação e fitorremediação, no controle de balanço de água e, em alguns casos, no sequestro de contaminantes de solos e aquíferos.

O gênero *Atriplex* pertence à família Chenopodiaceae, que conta com mais de 400 espécies distribuídas nas diversas regiões áridas e semiáridas do

mundo, principalmente na Austrália, onde apresenta uma diversidade de espécies e subespécies (Franclet & Le Houérou, 1971; Freire et al., 2010). É um arbusto de vida longa que se constitui em um dos recursos forrageiros adaptados a terrenos de sequeiro das regiões áridas e semiáridas em diversos continentes (Freire et al., 2010).

A *Atriplex nummularia*, por exemplo, é uma planta com necessidade de elevadas concentrações de NaCl para seu crescimento, destacando-se em regiões semiáridas por seu fácil estabelecimento, importante suporte proteico, produção constante de forragem e boa aceitabilidade pelo gado (Aganga et al., 2003; Ben Salem et al., 2003). Seu uso como forrageira é importante na complementação de dieta de ruminantes, graças ao seu valor nutritivo (em torno de 17% de proteína) e alta digestibilidade (70%) (IPA, 2004), apresentando, ainda, taxas de absorção de sais solúveis que atingem aproximadamente  $1,15 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Porto et al., 2001).

A fitoextração de sais solúveis utilizando plantas halófitas é uma alternativa de baixo custo para recuperação de solos salinos, não agressiva ao ambiente. Segundo Qadir et al. (2007), a fitorremediação é uma estratégia eficiente de recuperação de solos salino-sódicos, com performance comparável à utilização de corretivos químicos. Qadir et al. (2001) concluíram que a fitoextração revela efeitos de recuperação comparáveis aos da aplicação de gesso, esterco de curral ou água de irrigação tratada com ácido sulfúrico. Observaram, ainda, que a fitorremediação envolve custo de implantação e condução inferior ao custo investido para tratamentos com os corretivos químicos.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

O trabalho foi desenvolvido em duas fases: diagnóstico da qualidade dos solos do Perímetro Irrigado de Custódia – PE e recuperação de área degradada pela salinização/sodificação por meio das técnicas de fitorremediação com *Atriplex nummularia*, utilização de esterco bovino, esterco ovino, gesso e polímero aniônico.

#### **3.1. Avaliação da qualidade dos solos do Perímetro Irrigado de Custódia**

##### **3.1.1. Caracterização do local de estudo**

O Perímetro Irrigado de Custódia está localizado no município de Custódia, Microrregião do Sertão do Moxotó, no Estado de Pernambuco. O clima da região, segundo a classificação de Köppen é caracterizado como BSw'h', clima semiárido com curta estação chuvosa. A área fica a 330 km de Recife, capital do Estado, tendo como coordenadas geográficas: 8° 5' 0" de latitude Sul e 37° 37' 30" de longitude Oeste e encontra-se a 540 m acima do nível do mar. A implantação do perímetro irrigado foi iniciada em 1974 e concluída em 1975, sendo a operação iniciada em 1975 (DNOCS, 2008).

Inserido em região de clima semiárido, com pluviosidade média anual de 570 mm e estação chuvosa no período de fevereiro a maio, a área do perímetro é relativamente plana, predominando relevo suave-ondulado. Os solos mais frequentes na área são os Neossolos Flúvicos, com ocorrência de Neossolos Litólicos e Vertissolos. Tem suprimento hídrico do Açude Público de Custódia, com capacidade de acumulação de 21.623.170 m<sup>3</sup> e sua área irrigável corresponde a 350 ha, além de 991 ha de área de sequeiro, totalizando 1.341 ha. Esta área encontra-se dividida em 55 lotes de pequenos produtores. O sistema de irrigação utilizado no perímetro é, na sua maioria, por superfície em sulco (gravidade), na produção de banana, tomate, milho e feijão *phaseolus* (DNOCS, 2008).

Para discussão dos resultados utilizou os dados de precipitação pluviométrica mensal registrada no município de Custódia entre os anos de 2009 a 2011 (Figura 1).

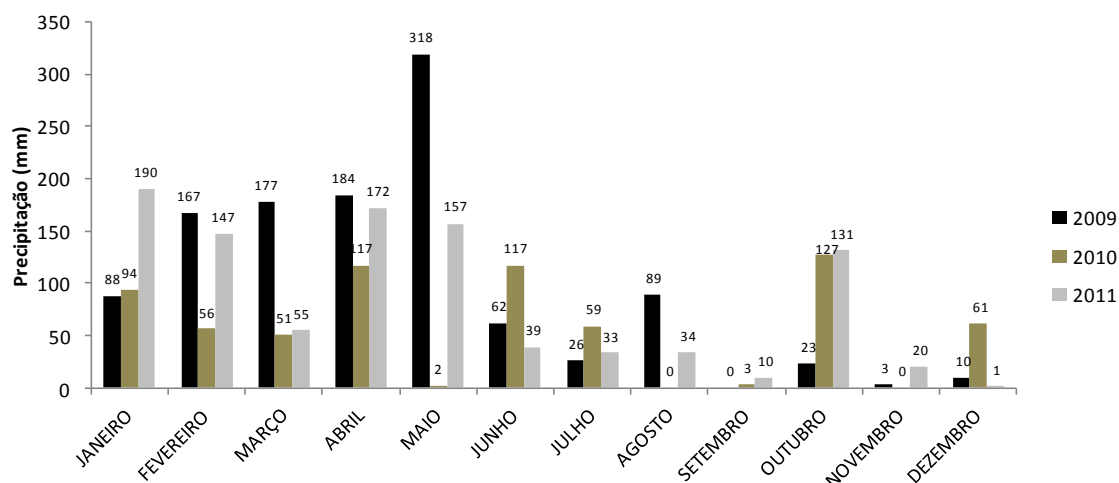


Figura 1. Médias de precipitação mensal registradas no município de Custódia-PE durante a condução do experimento. (IPA, 2012).

### 3.1.2. Amostragem dos solos

Na avaliação da qualidade dos solos da área, foram coletadas amostras em todos os 55 lotes que compõem o Perímetro Irrigado de Custódia - PE. A amostragem adotada foi do tipo aleatória (Meunier et al., 2001), tomando-se uma amostra de solo por lote em ponto georreferenciado (Figura 2).

Foram realizadas quatro amostragens, em duas épocas do ano, sendo duas após o período chuvoso (julho/2009 e julho/2010) e duas ao final do período seco (janeiro/2010 e janeiro/2011), nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm, com amostras simples em um ponto de cada lote.

Para os ensaios dos atributos químicos dos solos, como também os físicos dos solos que não dependem da estrutura, procedeu-se o preparo da terra fina seca ao ar (TFSA). Para isto, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm. Já para os ensaios dos atributos físicos que dependem da estrutura, a amostragem foi realizada por meio de anéis volumétricos, inseridos no solo com auxílio de amostrador tipo Uhland.

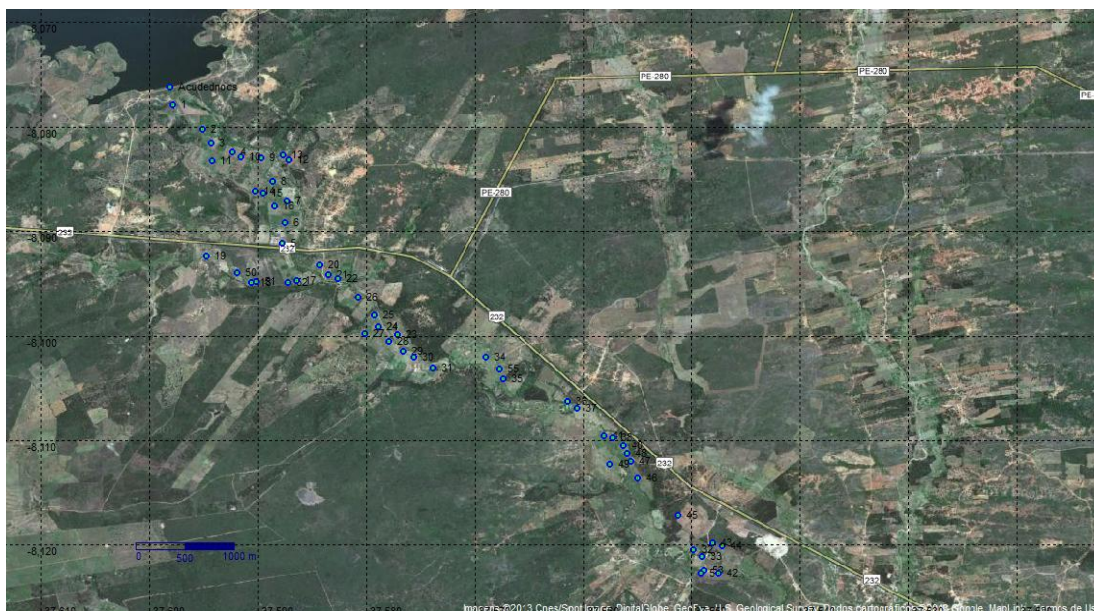


Figura 2. Imagem de satélite com a localização dos pontos de amostragem no Perímetro Irrigado de Custódia, Pernambuco.

### 3.1.3. Atributos químicos dos solos

Para a avaliação dos atributos químicos, as amostras de solo foram submetidas às análises dos elementos solúveis, com o preparo do extrato da pasta saturada, pelo método descrito por USSL Staff (1954). No extrato da pasta saturada mediram-se a condutividade elétrica (CE a 25°C) e o pH, determinaram-se os cátions solúveis:  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , por titulometria;  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  por fotometria de emissão de chama; e o ânion  $\text{Cl}^-$  por titulometria (USSL Staff, 1954).

Foram determinados, também, os cátions trocáveis  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ , extraídos com solução de acetato de amônio  $1 \text{ mol L}^{-1}$  e determinados:  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , por titulometria;  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ , por fotometria de emissão de chama; a capacidade de troca de cátions, pelo método do acetato de sódio e acetato de amônio  $1 \text{ mol L}^{-1}$  (USSL Staff, 1954).

Com os resultados das análises, foram calculadas: a relação de adsorção de sódio (RAS) e a percentagem de sódio trocável (PST), conforme USSL Staff (1954).

Na determinação do carbono orgânico total (COT), parte de cada amostra de solo foi macerada e passada em peneira de 0,149 mm, sendo o COT determinado pelo método de oxidação via úmida, com aquecimento externo (Yeomans & Bremner, 1988).



### **3.1.4. Atributos físicos dos solos**

#### **3.1.4.1. Análise Granulométrica**

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta de acordo com EMBRAPA (1997), porém, com utilização de agitação lenta de 50 rpm por 16 h e determinação de silte por pipetagem (Ruiz, 2005), e não por diferença.

#### **3.1.4.2. Argila dispersa em água**

A argila dispersa em água (ADA) foi determinada seguindo método descrito para análise granulométrica, com agitação lenta de 50 rpm por 16 horas e suprimindo-se o uso do dispersante químico (EMBRAPA, 1997). Com os dados de ADA e os de argila total, calculou-se o grau de dispersão.

#### **3.1.4.3. Densidade do solo e das suas partículas sólidas**

Para a determinação da densidade do solo, foram usadas as amostras coletadas em anéis (método do anel volumétrico), a partir de cada camada de solo estudada. A densidade das partículas sólidas do solo foi avaliada segundo o método do balão volumétrico, utilizando-se álcool como líquido penetrante. Ambos os procedimentos foram executados segundo EMBRAPA (1997).

### **3.2. Avaliação da qualidade das águas utilizadas no Perímetro Irrigado**

Foram realizadas amostragens de água nos quatro períodos avaliados, a partir das fontes de águas usadas no Perímetro Irrigado de Custódia e em seu entorno, abrangendo os principais reservatórios e fontes hídricas locais. Ao todo, foram coletadas 13 amostras de água por período avaliado. Nestas amostras foram realizadas: a medida do pH e da CE; determinando-se os teores dos cátions  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , por titulometria;  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , por fotometria de chama (USSL Staff, 1954); e os ânions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$  por titulometria, de acordo com recomendações da EMBRAPA (1997). Com estes dados calculou-se RAS.

### **3.3. Estatística descritiva e análise de agrupamento**

Por se tratar de um trabalho de amostragem de solos e água, os dados obtidos foram analisados e comparados entre si por meio das medidas de estatística descritiva, com destaque aos valores médios, máximos, mínimos e

coeficiente de variação. Desse modo, pode-se obter informações a respeito da amplitude dos valores comuns das variáveis avaliadas em solos característicos de região de clima semiárido susceptíveis à salinidade e sodicidade. Na análise do coeficiente de variação (CV) adotou-se o critério proposto por Warrick & Nielsen (1980), onde os coeficientes são classificados em três níveis: baixo ( $CV < 12\%$ ), médio ( $12\% < CV < 62\%$ ) e alto ( $CV > 62\%$ ).

Os procedimentos estatísticos multivariados foram realizados com o software STATISTICA 8.0. Desta forma, realizou-se a análise de agrupamento, a qual, em sua aplicação, engloba uma variedade de técnicas e algoritmos, sendo que o objetivo é encontrar e separar objetos em grupos similares. A medida de dissimilaridade utilizada foi a distância euclidiana e o algoritmo de WARD como método de agrupamento. A escolha do método de WARD ocorreu devido o mesmo ser usado por diferentes pesquisadores em estudos de água e solo (Meireles, 2007; Palácio et al., 2009).

O resultado da análise de agrupamento foi apresentado em gráfico na forma de árvore, conhecido como dendrograma. Este gráfico auxiliou na identificação dos agrupamentos dos lotes do perímetro mais semelhantes. A quantidade de grupos foi definida pela partição do dendrograma na primeira maior distância de ligação obtida, identificada no gráfico das distâncias de ligação nos sucessivos passos da análise de agrupamento.

### **3.4. Experimento de recuperação de solo**

#### **3.4.1. Local de instalação do experimento em campo**

Dos 55 lotes do Perímetro Irrigado de Custódia, foi escolhido um lote com problemas de excesso de sais (lote de número 5) para a instalação do experimento em campo para recuperação do solo. O experimento foi implantado no referido lote e conduzido no período de Outubro de 2009 a Abril de 2011, totalizando dezoito meses de acompanhamento. Neste experimento foram avaliadas as propriedades químicas e físicas dos solos em resposta à aplicação de seis tratamentos para avaliar a recuperação dos solos do lote.

### 3.4.2. Delineamento experimental, tratamentos e amostragem do solo

O experimento foi instalado obedecendo ao delineamento em blocos casualizados, com seis tratamentos e quatro repetições, em parcelas de 12 x 12 m (144 m<sup>2</sup>), perfazendo uma área experimental de 3.456 m<sup>2</sup>, e a área útil correspondeu a 64 m<sup>2</sup> (8 x 8 m). Os tratamentos foram: 1) aplicação de esterco bovino (40 Mg ha<sup>-1</sup>); 2) esterco ovino (40 Mg ha<sup>-1</sup>); 3) gesso (20 Mg ha<sup>-1</sup>); 4) polímero aniônico aplicado em solução a 0,001%; 5) fitorremediação com plantas de *Atriplex nummularia*; e 6) tratamento testemunha, sem nenhuma intervenção.

A definição da quantidade dos estercos e do gesso foi baseada no trabalho realizado por Gomes et al. (2000), levando-se em consideração a disponibilidade dos produtos na região. A dose de polímero foi determinada em função do estudo de Almeida (2008).

As operações de implantação do experimento compreenderam: isolamento da área com cerca de arame, limpeza manual da área, revolvimento do solo manualmente para posterior incorporação dos estercos e do gesso, aplicação do polímero e plantio das mudas de atriplex.

A incorporação dos produtos gesso, esterco bovino e ovino foi manual (enxada), tendo-se o cuidado de incorporá-los uniformemente no interior das parcelas. Nas parcelas destinadas ao polímero aplicou-se lâmina de 5 mm de solução contendo o PAM na concentração de 0,001%, manualmente via regador e com distribuição uniforme em toda a área da parcela.

No tratamento relacionado à *Atriplex nummularia*, foram utilizadas mudas com idade de 90 dias e cerca de 20 cm de altura, sendo propagadas por estaquia a partir de uma mesma planta matriz para reduzir a variabilidade entre plantas, propagadas em sacos de polietileno com substrato composto de areia e composto orgânico na proporção de 1:1. Foram plantadas 16 mudas por parcela, com espaçamento entre plantas de 3 x 3 m. O transplântio foi realizado manualmente, com uma planta por cova, sem a aplicação de fertilizantes. Logo após o transplântio das mudas foi realizada irrigação manual na cova, mantendo-se irrigação semanal nos primeiros 30 dias para o estabelecimento das mudas.

No momento da montagem do experimento e a cada seis meses depois, foram coletados amostras de solo em três pontos aleatórios distintos dentro de

cada parcela útil para formação de uma amostra composta, sendo realizadas quatro amostragens, sendo a primeira no momento da instalação do experimento (Outubro de 2009), aos seis (Abril de 2010), aos doze (Outubro de 2010) e aos dezoito meses (Abril de 2011). As amostras foram coletadas nas camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm de profundidade do solo. No tratamento com as plantas de atriplex, coletaram-se amostras de solo a 30 cm de distância da planta nas três profundidades.

Na primeira coleta (Outubro de 2009) e na última (Abril de 2011) coletaram-se amostras não deformadas em cilindros volumétricos nas profundidades de 0-10 cm e 10-30 cm para realização das análises físicas do solo e diagnóstico do efeito dos tratamentos em algumas das propriedades físicas que dependem da estrutura do solo.

### **3.4.3. Atributos químicos e físicos**

Para os atributos químicos no experimento foram monitoradas as mesmas variáveis descritas para o diagnóstico do Perímetro Irrigado, seguindo-se os mesmos métodos. Nos atributos físicos, além da argila dispersa em água e da densidade do solo; foram realizadas a condutividade hidráulica do solo em meio saturado; porosidade total, macro e microporosidade, resistência mecânica do solo à penetração e índice de dispersão (EMBRAPA, 1997).

#### **3.4.3.1 Condutividade hidráulica de solo em meio saturado**

Na determinação da condutividade hidráulica do solo em meio saturado em laboratório, foram utilizadas amostras de solo com estrutura não deformada obtidas por meio de anéis volumétricos, conforme já comentado anteriormente. Em laboratório, as amostras foram preparadas 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 coberta com tecido permeável à água, fixada com auxílio de liga de borracha.

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

### **3.4.3.2. Porosidade total, macro e microporosidade.**

Após a realização da condutividade hidráulica em meio saturado, as amostras foram saturadas novamente por capilaridade durante 24 horas e submetidas a diferentes tensões de água no solo: 0,1; 0,3; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0 e 6,0 kPa de coluna d'água em mesa de tensão.

A separação da porosidade total em macro e microporos foi realizada 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, considerado similar ao volume de microporos, obtendo-se assim a microporosidade. Conhecendo-se a porosidade total e a microporosidade, em relação à macroporosidade, esta foi obtida por diferença.

### **3.4.3.3. Resistência do solo à penetração de raízes**

A determinação da resistência do solo à penetração das raízes foi realizada em laboratório na umidade equilibrada a tensão equivalente a 6,0 kPa de coluna de água, para o qual os macroporos do solo encontram-se vazios, isentos de água. Após equilíbrio das amostras de solo à 6,0 kPa, estas eram retiradas da mesa de tensão e pesadas, iniciando-se em seguida os procedimentos de leitura de resistência à penetração por penetrômetro eletrônico de bancada, equipado com célula de carga com capacidade nominal de 20 kgf acoplada a um microcomputador. Adotou-se uma haste de 4,02 mm de diâmetro. A velocidade de penetração foi de  $0,1667 \text{ mm s}^{-1}$ , medindo-a da superfície até a profundidade de 4,5 cm, descartando os valores iniciais das leituras (1 cm) por conta do efeito bordadura. Deste modo, foram utilizados os dados dos 3 cm centrais da amostra, calculando-se a média da resistência do solo à penetração das várias medições realizadas nesse intervalo.

### **3.4.3.4. Índice de dispersão**

O índice de dispersão é a proporção da argila dispersa em água (ADA) em relação à argila total, calculado com os valores de argila total obtidos na análise granulométrica e na ADA.

#### **3.4.4. Análises estatísticas**

As variáveis estudadas foram submetidas à análise de variância em função dos tratamentos, tempo e profundidade dos solos. As médias das variáveis significativas foram submetidas ao teste de Scott-Knott ( $P < 0,05$ ), utilizando o software SAEG 9.1 (UFV, 2007).

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Atributos químicos dos solos do Perímetro Irrigado**

#### **4.1.1. Estatística descritiva dos atributos químicos dos solos**

Em solos afetados por sais, o pH atinge valores próximos da neutralidade ou na faixa alcalina, indicando a predominância de íons  $\text{OH}^-$  na solução do solo. Os valores médios encontrados para pH do solo e da pasta saturada para quase todos os 55 lotes, quando comparados nas três profundidades, foram alcalinos, aumentando em sua maioria em profundidade e atingindo valores mais altos na camada de 30-60 cm (Tabela 1). Tanto o pH do solo, quanto do extrato da pasta de saturação em média, para a maioria das amostras coletadas nas quatro épocas e nas três profundidades, esteve na faixa alcalina, predominantemente entre os valores 6,98 e 8,72, contrastando com os valores de pH comumente observados em solos brasileiros.

O pH de algumas amostras ficou acima de 9,0, atingindo valor máximo de 10,30 e 11,20 para pH do solo e da pasta saturada, respectivamente, sendo este um dos fatores que afetam a predisposição do solo em dispersar as argilas, além de causar deficiências de alguns micronutrientes às plantas. No entanto, também foram observados alguns valores baixos de pH do solo, na faixa da acidez, com valor mínimo de 4,8.

Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Chaves et al. (2004), os quais realizaram um levantamento das propriedades químicas dos solos da Ilha de Assunção, localizada no Rio São Francisco, em Cabrobó, PE. Após a coleta de 1.053 amostras de solos nas profundidades de 0-30 cm em 1.131 ha, estes autores verificaram uma grande amplitude nos valores de pH, variando de 4,43 a 8,90, de fortemente ácida até alcalina. No entanto, os valores médios encontrados na ilha indicam que predominam na área estudada resultados de pH moderadamente ácidos (5,85), enquanto que os encontrados no Perímetro Irrigado de Custódia estão em média na faixa alcalina (Tabela 1).

Tabela 1. Medidas estatísticas descritivas e valores médios de pH do solo, pH do extrato de saturação, condutividade elétrica, íons solúveis e relação de adsorção de sódio no extrato de saturação dos solos nos 55 lotes do Perímetro Irrigado de Custódia (PE), em função da profundidade e da época de coleta

Coleta	Camada cm	pH <sub>a</sub> <sup>1</sup>	Elementos solúveis							RAS <sup>4</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>0,5</sup>
			pH <sub>p</sub> <sup>2</sup>	CE <sub>es</sub> <sup>3</sup> dS m <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup> cmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	
Jul/09	0-10	7,13	7,78	0,78	2,45	0,65	4,58	3,08	0,50	1,44
	10-30	7,66	7,80	0,93	6,85	0,33	5,11	3,62	0,92	3,46
	30-60	7,89	7,84	1,48	12,42	0,24	4,08	3,08	1,43	7,22
	Média	7,56	7,80	1,06	7,24	0,41	4,59	3,26	0,95	4,04
	Máximo	10,27	9,40	11,85	116,4	5,76	37,00	40,00	12,25	104,1
	Mínimo	5,22	6,58	0,22	0,10	0,07	0,90	0,30	0,00	0,10
	CV (%)	9,79	6,84	129,6	231,1	141,9	88,45	160,3	180,9	261,5
Jan/10	0-10	6,98	7,89	1,26	4,07	1,73	5,30	4,67	0,80	2,05
	10-30	7,40	7,94	1,16	8,58	0,61	3,42	3,23	1,05	4,68
	30-60	7,89	7,91	1,27	10,66	0,53	2,30	1,94	1,04	7,37
	Média	7,42	7,92	1,23	7,76	0,96	3,68	3,28	0,96	4,70
	Máximo	10,30	9,00	10,56	117,21	8,66	27,90	18,85	14,50	66,01
	Mínimo	5,12	6,70	0,20	0,11	0,08	0,24	0,15	0,00	0,05
	CV (%)	9,99	5,38	118,5	221,7	140,6	100,7	93,36	186,1	214,08
Jul/10	0-10	8,72	7,57	0,93	4,16	0,64	2,46	1,53	0,48	2,84
	10-30	7,42	7,70	1,28	6,13	0,32	3,25	1,72	0,77	3,89
	30-60	7,72	7,71	1,73	9,80	0,22	2,61	1,34	1,21	6,62
	Média	7,96	7,66	1,31	6,70	0,39	2,77	1,53	0,82	4,45
	Máximo	9,40	11,20	11,83	112,3	5,43	31,50	12,20	9,00	56,20
	Mínimo	4,80	6,30	0,19	0,82	0,05	0,40	0,10	0,00	0,56
	CV (%)	8,53	7,23	127,1	190,3	177,3	118,8	101,0	165,5	162,5
Jan/11	0-10	7,36	8,13	1,23	4,21	1,19	3,57	2,35	2,10	2,27
	10-30	7,68	8,09	1,30	7,05	0,35	2,90	1,66	1,81	4,41
	30-60	7,98	8,02	1,82	11,07	0,17	2,89	1,94	2,30	6,60
	Média	7,67	8,08	1,46	7,45	0,57	3,12	1,99	2,07	4,43
	Máximo	9,40	10,00	15,73	149,9	5,38	18,15	27,20	19,50	86,5
	Mínimo	5,50	6,20	0,24	0,81	0,07	0,55	0,10	0,00	0,60
	CV (%)	7,53	6,46	139,3	229,1	137,3	87,19	130,9	121,5	212,5

<sup>1</sup>pH em água (1:2,5); <sup>2</sup>pH do extrato de saturação; <sup>3</sup>Condutividade elétrica do extrato de saturação; <sup>4</sup>Relação de adsorção de sódio; CV – Coeficiente de variação.

Verificou-se que a CEes média dos solos dos lotes do perímetro nas quatro coletas foi, em sua maioria, baixa, mas com acréscimos em profundidade, indicando um acúmulo de sais nas camadas mais profundas do solo, com maior valor médio de 1,82 dS m<sup>-1</sup> na camada de 30-60 cm para a coleta de janeiro de 2011 (Tabela 1). Contudo, observou-se a variabilidade da CEes em todas as amostras analisadas, com valores mínimos e máximos bastante variáveis entre os lotes do perímetro, indo de 0,19 a 15,73 dS m<sup>-1</sup>, com acréscimo de mais de 80 vezes o valor mínimo, refletindo nos elevados coeficientes de variação, acima de 100%. Desta forma, pode-se concluir que



existe uma elevada variabilidade dos solos da área, estando alguns salinizados e outros não. Apesar desta elevada variabilidade em termos de CEes, a maioria dos solos tem valores inferiores a  $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ , estando abaixo do limite de  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , que classifica os solos como salinos (USSL Staff, 1954).

Comportamento semelhante foi obtido por Mendes et al. (2008), avaliando a variabilidade temporal da fertilidade, salinidade e sodicidade dos solos nas áreas irrigadas da região de Congo – PB, que encontraram valores mínimos e máximos entre  $0,10$  e  $10,88 \text{ dS m}^{-1}$ , respectivamente, estando a média abaixo de  $2,40 \text{ dS m}^{-1}$ , valores estes também inferiores ao limite que classifica os solos salinos. No entanto, para estes autores a amplitude observada deve ser analisada com certas restrições, uma vez que o uso dos valores extremos pode não refletir o que ocorre em toda a área.

Entre os cátions solúveis avaliados, o  $\text{Na}^+$  foi o de concentrações mais elevadas, principalmente nas camadas mais profundas do solo, atingindo valores médios de  $\text{Na}^+$  solúvel de até  $12,42 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  nas camadas de 30-60 cm. Observou-se, também, que os valores aumentaram em profundidade, podendo-se considerar que, em geral, as limitações associadas aos solos aluviais em ambiente semiárido podem estar relacionadas à ocorrência de sais solúveis, especialmente de  $\text{Na}^+$ , em camadas mais profundas.

Oliveira et al. (2002) avaliando as características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas de três perfis de solos afetados por sais no Perímetro Irrigado de Custódia-PE, cujo uso agrícola foi interrompido em virtude de problemas de salinidade e sodicidade dos solos, verificaram que entre os cátions solúveis avaliados, o  $\text{Na}^+$  foi o que apresentou concentrações mais elevadas, encontrando valores de  $9,5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  e  $10,5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  na camada de 0-15 cm em dois perfis analisados.

Ao se avaliar a distribuição dos valores de  $\text{Na}^+$  solúvel, observaram-se resultados elevadíssimos, chegando até  $149,9 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  na quarta coleta, por outro lado, encontraram-se valores muito baixos, com valor mínimo de  $0,10 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ , esta discrepância entre os valores de  $\text{Na}^+$  solúvel é refletida no coeficiente de variação, que chegou a valores da ordem de 231,1%. No entanto, a maioria dos resultados deste elemento encontra-se abaixo de  $15,0 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ . Mesmo nestas concentrações, segundo Ayers & Westcot (1999), são capazes de gerar danos severos às culturas sensíveis.

Ao contrário do  $\text{Na}^+$ , o  $\text{K}^+$  solúvel diminuiu com a profundidade, sendo um fator negativo ao desenvolvimento das culturas agrícolas, que necessitam de um fornecimento adequado deste macronutriente. Os valores médios de  $\text{K}^+$  ficaram bem abaixo dos de  $\text{Na}^+$ , podendo representar uma limitação à absorção do primeiro pelas plantas, pela competição com o  $\text{Na}^+$ , elemento não essencial e tóxico, causando prejuízos ao desenvolvimento vegetal e às propriedades físicas do solo.

Isso também é observado na distribuição dos resultados de  $\text{K}^+$  solúvel, que se encontram na média geral abaixo de  $1,73 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ . Oliveira et al. (2002) obtiveram resultados semelhantes em três perfis de solos do Perímetro Irrigado de Custodia-PE, encontrando valores de  $\text{K}^+$  solúvel abaixo de  $1,5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ . Porém, da mesma forma que o  $\text{Na}^+$ , ocorre uma variabilidade enorme dos dados, encontrando valores mínimos de  $0,05 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  até valores máximos de  $8,66 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ . Mesmo a fertilização não sendo prática muito comum na região, é possível que os maiores teores de  $\text{K}^+$  na camada superficial ocorra por adubações potássicas em alguns cultivos agrícolas de maior retorno econômico encontrados no perímetro, como tomate, pimentão, cebola, banana etc.

Chaves et al. (2009) analisando um comparativo entre as concentrações dos íons em solos irrigados com aqueles presentes em solos de mata nativa no Distrito de Irrigação do Perímetro Araras Norte-CE, observaram que os maiores valores de  $\text{K}^+$  solúvel na camada de 0-30 cm na área irrigada ocorreram nos meses de Janeiro de 2004 ( $3,63 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ), Setembro de 2004 ( $3,27 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ), Janeiro de 2005 ( $4,81 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ), Março de 2005 ( $3,43 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ) e Julho de 2005 ( $9,97 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ). Enquanto que nos referidos meses, na mata nativa, não foram verificadas elevações nas concentrações do  $\text{K}^+$  solúvel. O maior valor encontrado na camada de 0-30 cm da mata nativa foi de  $1,51 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ , em Março de 2004. Estes valores elevados na área irrigada estão associados à utilização de fertilizantes minerais como o sulfato e cloreto de potássio, os quais foram aplicados em maiores quantidades no mês de Julho.

Os menores teores de  $\text{K}^+$  na solução do solo são resultantes do referido equilíbrio entre os demais cátions, relacionados com os teores de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , que predominam no sistema. Santos et al. (2005) afirmam que, de maneira geral, as concentrações de  $\text{K}^+$  tendem a ser menores com o aumento da relação Na:Ca na solução do solo.

Por outro lado, os cátions  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  não aumentaram em profundidade, sendo verificadas oscilações das médias destes elementos com o aumento da profundidade (Tabela 1). Estes cátions solúveis, em sua maioria, estão presentes em valores médios abaixo de  $5,5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ , entretanto, em alguns solos analisados foram observados valores máximos de  $37,00 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  e  $40 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  e mínimos de até  $0,24 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  e  $0,10 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  para  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , respectivamente.

Ao se observar os valores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  encontrados, verifica-se que estes estão elevados e os solos estariam aptos a suprir as necessidades da maioria das plantas cultivadas, contrastando com os valores destes nutrientes no geral de solos brasileiros, caracteristicamente muito intemperizados e pobres nestes elementos. No entanto, estão dentro da faixa mais comum para solos de semiárido, muitas vezes com elevados teores destes íons. Ressalta-se, contudo, os possíveis problemas de absorção destes nutrientes, tendo em vista os maiores teores de  $\text{Na}^+$  em alguns destes solos, podendo dificultar a absorção de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  por competição no meio, bem como problemas de condutividade hidráulica nos solos promovida pela predominância do  $\text{Na}^+$ , íon caracteristicamente dispersivo, especialmente em solos de semiárido com elevados teores de argilominerais do tipo 2:1 na fração argila.

Os resultados de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  solúveis encontram-se superiores aos verificados por Lopes et al. (2008), os quais avaliando o impacto da irrigação sobre os solos dos Distritos irrigados Baixo Acaraú-CE, verificaram que as concentrações médias dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  nas áreas irrigadas nas camadas de 0-30 cm foram de  $0,12 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  e  $0,20 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  respectivamente, considerados valores muito baixos. Esses valores são bem inferiores ao limite mínimo para a solução do solo apresentado por Ayers & Westcot (1999).

Os valores médios de  $\text{Ca}^{2+}$  encontrados nos lotes do perímetro irrigado estão acima do limite mínimo para a solução do solo apresentado por Ayers & Westcot (1999), os quais comentam que, se a concentração deste cátion na solução do solo for inferior a  $2,0 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ , há alta probabilidade de redução na produção das culturas, como também pode apresentar deficiência de Ca na planta.

Adicionalmente, solos com elevadas relações do íon  $\text{Na}^+$  para  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  são altamente susceptíveis aos processos de dispersão de coloides, pela saturação do complexo de troca com o primeiro em detrimento dos dois

últimos. O  $\text{Na}^+$ , por ser monovalente e ter um grande raio hidratado, promove a dispersão de argilominerais carregados negativamente, promovendo a dispersão coloidal. Com isso, os coloides dispersos são conduzidos ao longo do perfil do solo, obstruindo poros em subsuperfície e formando horizontes ou camadas mais adensadas que dificultam a movimentação da água e do ar em profundidade. Solos com este tipo de problema são muito comuns na área do Perímetro Irrigado de Custódia e tornam-se degradados com facilidade.

Nas quatro coletas de solo analisadas verificou-se um acréscimo nos teores de  $\text{Cl}^-$  e dos valores da RAS com o aumento da profundidade do solo (Tabela 1). A maioria dos resultados de  $\text{Cl}^-$  nos solos estão abaixo de  $2,5 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  e da RAS abaixo de  $8,0 (\text{mmol}_c \text{ L}^{-1})^{0,5}$ . Contudo, é preciso atentar que estes são valores médios, mas não refletem toda a comunidade de solos encontrados no Perímetro, em que algumas amostras de solo tiveram valores elevados de  $\text{Cl}^-$  e RAS, chegando a valores máximos de  $19,50 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  e  $104,1 (\text{mmol}_c \text{ L}^{-1})^{0,5}$ , respectivamente. Isso é apenas um indicativo da amplitude de variação dos solos do Perímetro Irrigado de Custódia, que pode acarretar sérios problemas ao solo e às plantas cultivadas. Vale salientar que a RAS apresentou dentro do perímetro irrigado alguns valores acima do limite de classificação de solos sódicos ( $\text{RAS} > 13,0$ ), valor este preconizado pela USSS Staff (1954).

Estes acréscimos de  $\text{Cl}^-$  em profundidade estão de acordo com os resultados encontrados por D'Almeida et al. (2005), os quais avaliando a importância relativa dos íons na salinidade de um Cambissolo na Chapada do Apodi-CE, observaram que as concentrações máximas de  $\text{Cl}^-$  ocorreram na camada mais profunda do solo, o que pode indicar excessiva aplicação de lâmina d'água, promovendo a lixiviação do excesso de  $\text{Cl}^-$  para as camadas inferiores.

Quanto à RAS, a maioria dos solos nas quatro amostragens realizadas ficou com valores médios próximos de  $5,0 (\text{mmol}_c \text{ L}^{-1})^{0,5}$ , entretanto, mesmo estes valores podem representar um risco de sodificação de solos que tenham em sua fração argila a presença de argilominerais do tipo 2:1, especialmente as expansíveis, mais reativas ao íon  $\text{Na}^+$ . Dependendo da mineralogia destes solos, a susceptibilidade à sodificação pode ser alta com estes baixos valores da relação encontrados.

O mesmo comportamento encontrado para os cátions solúveis  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  foi verificado para estes cátions na forma trocável, com acréscimos médios de  $\text{Na}^+$  em profundidade e diminuição de  $\text{K}^+$  nas quatro coletas realizadas (Tabela 2). Os teores de  $\text{K}^+$  trocável foram maiores na camada superficial (0-10 cm), o que pode ser atribuído ao manejo utilizado, possivelmente com adição de fertilizantes potássicos e maiores acréscimos de matéria orgânica na camada superficial nos solos.

Resultados semelhantes foram obtidos por Macedo & Menino (1998), os quais avaliaram a variabilidade temporal dos sais na água de irrigação e seus efeitos sobre os solos irrigados do Projeto Vereda Grande, em Boqueirão-PB, e verificaram que os sais de  $\text{Na}^+$  trocável aumentaram em profundidade, variando de  $0,30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  na camada de 0-15 cm até  $1,21 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  na camada de 165-200 cm. Da mesma forma que no Perímetro Irrigado de Custódia, os teores de  $\text{K}^+$  trocável foram mais elevados na camada superficial.

Os teores médios de  $\text{Na}^+$  trocável foram inferiores a  $1,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , contudo, estes valores variaram muito, com resultado máximo de  $11,04 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  e mínimo de  $0,10 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Já para o  $\text{K}^+$  o valor máximo chegou a  $2,63 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , mas com predominância de valores abaixo de  $0,40 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

Da mesma forma que o  $\text{Na}^+$ , os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis em quase todas as coletas realizadas cresceram com o aumento da profundidade (Tabela 2), com valores máximos de  $8,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  para o  $\text{Ca}^{2+}$  e de  $1,80 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  para o  $\text{Mg}^{2+}$ . Porém, é importante salientar que a maioria das amostras de solo tiveram teores de  $\text{Ca}^{2+}$  abaixo de  $1,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  e os teores de  $\text{Mg}^{2+}$  abaixo de  $0,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

Desta maneira, considerando-se que os níveis de  $2,0$  a  $3,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de  $\text{Ca}^{2+}$  são adequados para o desenvolvimento das culturas, segundo Raij (1981), pode-se afirmar que no perímetro estudado a maioria dos lotes está com deficiência deste elemento na forma trocável. Isso, no entanto, não permite inferir que as culturas nessa área apresentarão deficiência de  $\text{Ca}^{2+}$ . Segundo Raij (1991), as necessidades de  $\text{Ca}^{2+}$  para a maioria das culturas não são elevadas e os teores existentes no solo, em geral, são suficientes, mesmo considerando que o limite mínimo do elemento no solo possa estar abaixo de  $1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . Por outro lado, segundo este mesmo autor, considera-se que o teor de  $\text{Mg}^{2+}$  suficiente para a maioria das culturas está em torno de  $0,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ,

é possível afirmar que, no perímetro em estudo, não há deficiência deste elemento.

Tabela 2. Medidas estatísticas descritivas e valores médios dos teores de cátions trocáveis, capacidade de troca de cátions, percentagem de sódio trocável e carbono orgânico total dos solos nos 55 lotes do Perímetro Irrigado de Custódia (PE), em função da profundidade e da época de coleta

Coleta	Camada cm	Elementos trocáveis				CTC <sup>1</sup>	PST <sup>2</sup> %	COT <sup>3</sup> dag kg <sup>-1</sup>
		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>			
Jul/09	0-10	0,84	0,54	1,37	0,58	13,58	7,85	0,99
	10-30	1,30	0,32	1,43	0,64	14,93	9,54	0,75
	30-60	1,98	0,26	1,52	0,64	14,33	14,35	0,64
	Média	1,37	0,37	1,44	0,62	14,28	10,58	0,79
	Máximo	10,09	1,41	2,80	1,68	37,29	69,80	2,25
	Mínimo	0,34	0,11	0,40	0,04	3,68	1,45	0,02
	CV (%)	113,7	60,42	33,48	50,76	44,55	99,34	44,92
Jan/10	0-10	0,49	0,49	1,18	0,62	-	4,70	1,11
	10-30	0,72	0,26	1,30	0,64	-	5,23	0,83
	30-60	1,38	0,19	1,50	0,66	-	9,84	0,69
	Média	0,87	0,31	1,33	0,64	-	6,60	0,87
	Máximo	11,04	1,54	4,40	1,45	-	84,61	2,55
	Mínimo	0,10	0,01	0,60	0,18	-	1,01	0,01
	CV (%)	197,2	76,25	38,82	37,34	-	191,7	44,42
Jul/10	0-10	0,49	0,51	1,30	0,58	-	4,16	1,11
	10-30	0,70	0,31	1,22	0,65	-	4,81	0,79
	30-60	1,22	0,25	1,26	0,67	-	9,30	0,65
	Média	0,81	0,36	1,26	0,64	-	6,09	0,85
	Máximo	9,10	1,47	2,80	1,80	-	53,00	2,34
	Mínimo	0,14	0,06	0,60	0,17	-	0,57	0,06
	CV (%)	163,9	77,20	32,80	45,86	-	152,3	45,89
Jan/11	0-10	0,45	0,87	0,99	0,52	-	3,88	1,47
	10-30	0,77	0,42	1,24	0,56	-	5,81	1,10
	30-60	1,26	0,25	1,05	0,59	-	8,77	0,97
	Média	0,83	0,52	1,09	0,56	-	6,16	1,18
	Máximo	7,65	2,63	8,00	1,55	-	71,64	2,92
	Mínimo	0,16	0,08	0,60	0,13	-	0,82	0,06
	CV (%)	158,9	90,31	65,90	45,53	-	167,7	37,14

<sup>1</sup>Capacidade de troca de cátions; <sup>2</sup>Percentagem de sódio trocável; <sup>3</sup>Carbono orgânico total; CV: coeficiente de variação

O comportamento dos teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> trocáveis foram também observados por Silva & Chaves (2006), os quais visando avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos de um solo no Perímetro Irrigado Senador Nilo

Coelho, Petrolina-PE, amostraram 70 pontos aleatoriamente em uma área de 200 hectares, e verificaram que a média para  $\text{Ca}^{2+}$  correspondeu a  $1,16 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  na profundidade de 0-30 cm e a média para o  $\text{Mg}^{2+}$  foi de  $0,94 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

A CTC, por ser a capacidade total de retenção de cátions, indica a possibilidade de um solo reter cátions para fornecê-los à solução, representando, portanto, aqueles que se tornarão disponíveis às plantas. Na maioria dos solos brasileiros, muito intemperizados, a CTC é baixa, contudo, os solos do Perímetro Irrigado de Custódia têm valores de CTC considerados de médio a alto segundo Mello et al. (1983), chegando a um valor máximo de  $37,29 \text{ cmol}_c \text{ L}^{-1}$ . Os elevados valores de CTC refletem a riqueza destes solos em bases, das quais três importantes nutrientes para as plantas,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ , bem como a provável presença de argilominerais do tipo 2:1, de elevada carga elétrica permanente.

Entretanto, apenas a constatação de que os solos têm elevada CTC e isso indica maior aporte de cátions básicos para as plantas não é suficiente. Dependendo dos cátions saturantes no complexo de troca dos solos, em algumas situações, valores mais elevados de CTC podem representar grandes proporções de  $\text{Na}^+$ , o que pode ser um indicativo de degradação por sodicidade, avaliada por meio da PST.

Nos solos do Perímetro avaliado a PST aumentou em profundidade em todas as quatro coletas realizadas (Tabela 2), com valores abaixo do limite de solos sódicos ( $\text{PST} \geq 15\%$ ), definido pelo USSL Staff (1954). A predominância de solos nos lotes foi com PST abaixo de 12%, porém, encontrou-se amostra de solo com até 84,61%, valor este muito elevado para as culturas agrícolas e que torna o solo improdutivo. Entretanto, dependendo do tipo de solo, este limite pode não ser adequado, pois valores de PST bem inferiores ao limite preconizado pela USSL Staff (1954) já foram suficientes para reduzir a condutividade hidráulica de solos, tornando-os inaptos para a irrigação (Freire et al., 2003a).

Outra variável que diferencia muito os solos de semiárido dos demais solos é o acúmulo de matéria orgânica, expressa na forma de carbono orgânico total, em que os teores são sempre baixos, compatíveis com a condição de semiaridez da região. Seus valores mais elevados foram encontrados na camada superficial e diminuíram com a profundidade (Tabela 2). Os baixos valores observados são comuns em regiões de clima semiárido, onde as

elevadas taxas de decomposição da matéria orgânica não são acompanhadas pelos acréscimos de carbono ao solo. As médias nas quatro coletas variaram, sendo encontrado o valor máximo de  $2,92 \text{ dag kg}^{-1}$ , porém houve predominância de solos com teores abaixo de  $1,5 \text{ dag kg}^{-1}$ .

Mesmo sendo os valores de carbono orgânico considerados baixos neste estudo, encontram-se superiores na camada de 0-10 cm aos encontrados por Salcedo et al. (1997), os quais realizando um estudo na Chapada do Araripe avaliaram a fertilidade do solo em três sistemas: Caatinga, área recentemente queimada para conversão em área agrícola e área abandonada por um ano após cinco anos de cultivo e encontraram valores de carbono orgânico do solo na área de caatinga da ordem de  $0,98 \text{ dag kg}^{-1}$ .

Corrêa et al. (2009), avaliando áreas com uso de culturas de ciclo curto, área descartada, fruticultura, pastagem e vegetação nativa utilizando atributos químicos do solo no perímetro irrigado Icó-Mandantes – PE, obtiveram resultados de carbono orgânico total bem abaixo dos encontrados no Perímetro Irrigado de Custódia, estando em média na ordem de  $0,56 \text{ dag kg}^{-1}$ . Estes resultados demonstram a fragilidade da área em estudo, independente dos usos aplicados.

#### **4.1.2. Análise de agrupamento dos atributos químicos do solo**

Nas Figuras 3, 4, 5 e 6 estão representados os resultados das análises de agrupamento referentes aos 55 lotes do Perímetro Irrigado na profundidade de 30-60 cm em função da salinidade e sodicidade (pH, CE, RAS e PST) dos solos nas quatro coletas realizadas. Devido as médias do pH, CE, RAS e PST serem mais elevadas na camada de 30-60 cm, optou-se por realizar a análise de agrupamento apenas nesta camada.

No dendrograma das Figuras 3, 4, 5 e 6 a escala vertical indica o nível de similaridade e no eixo horizontal, são marcadas as amostras dos lotes agrupadas em função das variáveis utilizadas (pH, CE, RAS e PST). Estas variáveis, em geral, não são independentes, atuam conjuntamente na definição da degradação dos solos e, por isso, foram analisadas conjuntamente.

Esta análise de agrupamento foi realizada para verificar a formação dos grupos no dendrograma, ou seja, aquelas amostras que possuíam valores



médios aproximados de pH, CE, RAS e PST, as quais estão relacionadas com a salinidade e sodicidade do solo, formaram grupos homogêneos, enquanto que as variáveis que possuíam uma média diferenciada das demais formaram grupos heterogêneos.

Nos dendrogramas, os grupos foram definidos pelo traçado de uma linha paralela ao eixo horizontal, a qual foi definida com base no critério da maior distância entre os grupos (primeiro maior pulo), sendo definida a formação de oito grupos nas quatro coletas realizadas, sendo a numeração dos grupos feita da direita para esquerda.

Verifica-se na Figura 3, o grupo 1, formado pelos lotes 1, 3, 22, 7, 24 e 27, que são os lotes que possuem a maior semelhança no dendrograma, por possuírem a menor distância euclidiana. Em seguida, vem o grupo 2, representado pelos lotes 5, 11 e 14 e, assim, sucessivamente, sendo estas amostras agrupadas por ordem decrescente de semelhança, ou seja, o grupo 8 formou o último grupo do dendrograma, o qual manteve-se diferente dos demais grupos formados, pelo fato de possuir pouca semelhança em relação aos outros.

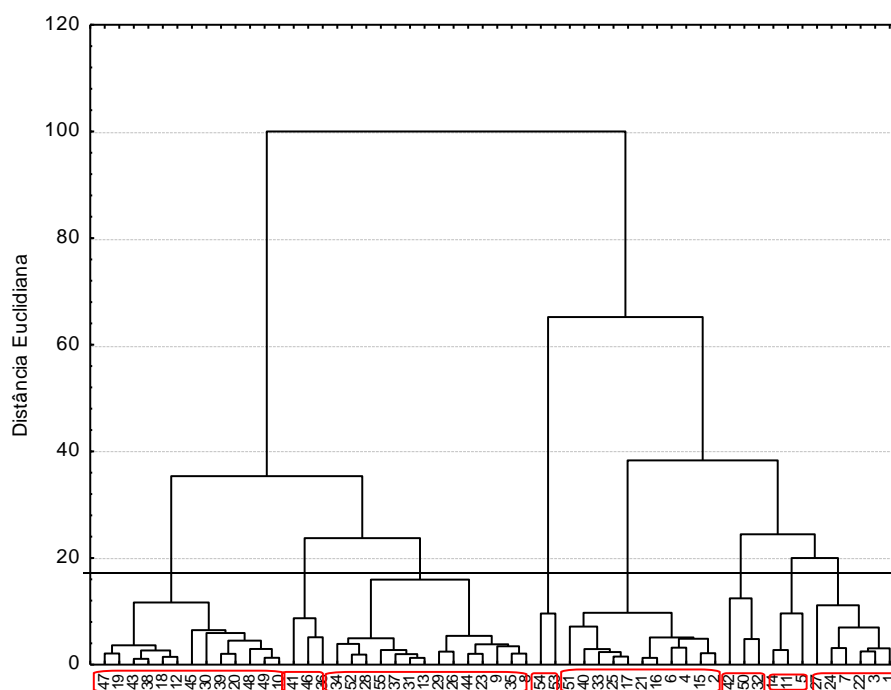


Figura 3 - Dendrograma resultante da análise de agrupamento dos valores de pH, CE, RAS e PST dos 55 lotes do Perímetro Irrigado na coleta de Julho de 2009 na profundidade de 30-60 cm, utilizando a distância euclidiana como coeficiente de similaridade e o algoritmo de WARD como método de agrupamento.

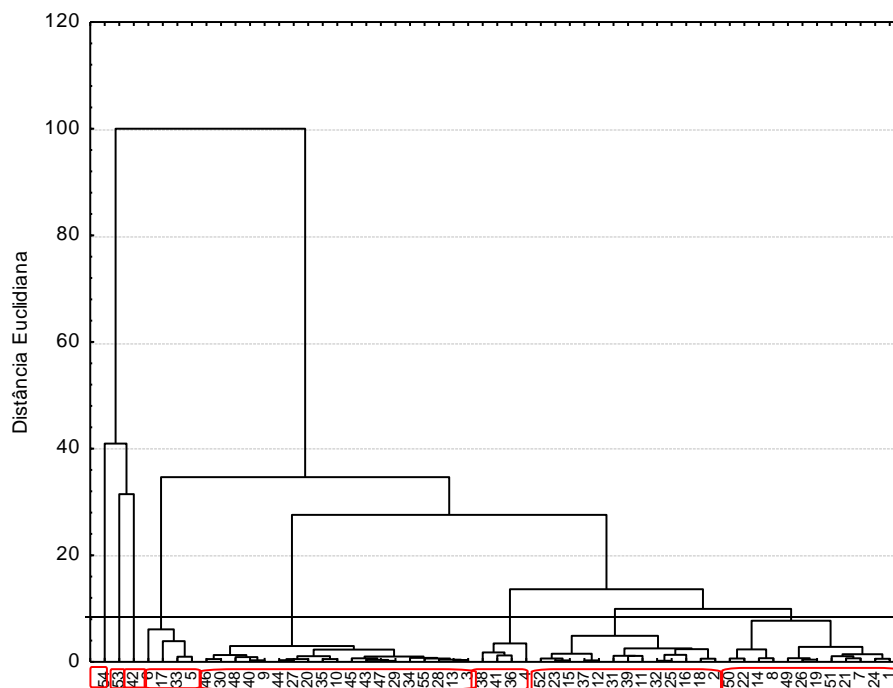


Figura 4 - Dendrograma resultante da análise de agrupamento dos valores de pH, CE, RAS e PST dos 55 lotes do Perímetro Irrigado na coleta de Janeiro de 2010 na profundidade de 30-60 cm, utilizando a distância euclidiana como coeficiente de similaridade e o algoritmo de WARD como método de agrupamento.

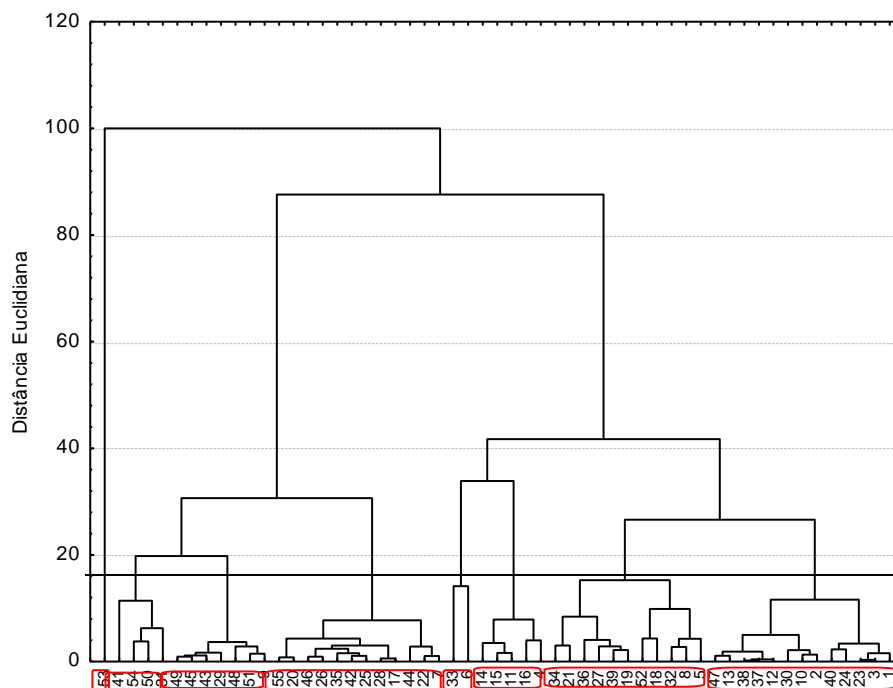


Figura 5 - Dendrograma resultante da análise de agrupamento dos valores de pH, CE, RAS e PST dos 55 lotes do Perímetro Irrigado na coleta de Julho de 2010 na profundidade de 30-60 cm, utilizando a distância euclidiana como coeficiente de similaridade e o algoritmo de WARD como método de agrupamento.

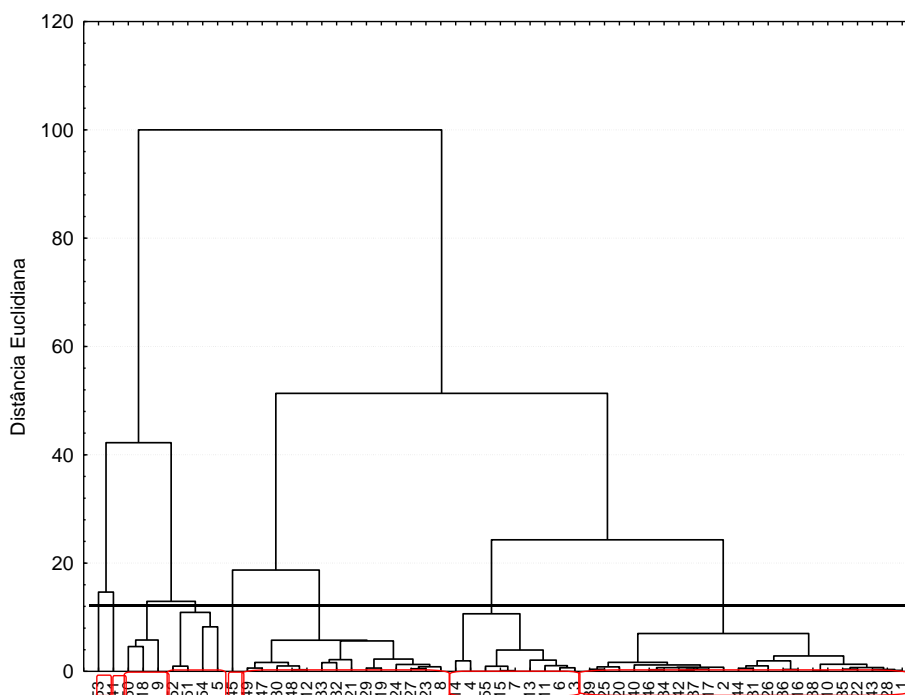


Figura 6 - Dendrograma resultante da análise de agrupamento dos valores de pH, CE, RAS e PST dos 55 lotes do Perímetro Irrigado na coleta de Janeiro de 2011 na profundidade de 30-60 cm, utilizando a distância euclidiana como coeficiente de similaridade e o algoritmo de WARD como método de agrupamento.

Levando-se em consideração os grupos formados nas quatro Figuras, observa-se que os grupos são distintos em cada época de amostragem, ou seja, existe homogeneidade dentro de cada grupo e heterogeneidade entre os grupos, isto é, estão agrupados por características em comum.

Os lotes do perímetro irrigado onde ocorreram os maiores problemas de salinidade e sodicidade na primeira coleta foram os que compõem o grupo 5 (Tabela 3), os quais são formados pelos lotes 53 e 54, com valores de pH, CE, RAS e PST de 10,27, 8,66 dS m<sup>-1</sup>, 85,07 (mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>)<sup>0,5</sup> e 63,82%, respectivamente. Estes lotes do perímetro irrigado encontram-se em pousio, devido à degradação associada aos problemas de salinidade e sodicidade dos mesmos. Estes solos podem ser considerados degradados, pois todas as quatro variáveis avaliadas os caracterizam como tal, desde o pH elevado, fora da faixa indicada para a maioria das culturas, a CE superior ao limite de salinidade, e a RAS e PST, indicando sua sodicidade.

Tabela 3 – Valores médios de pH, condutividade elétrica do extrato de saturação, relação de adsorção de sódio e percentagem de sódio trocável dos grupos formados na análise de agrupamento na profundidade de 30-60 cm nas quatro coletas realizadas

Atributos	Grupos formados na análise de agrupamento							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Coleta Julho de 2009								
pH <sup>1</sup>	7,96	8,95	8,22	8,10	10,27	7,57	7,71	7,37
CE <sup>2</sup> (dS m <sup>-1</sup> )	1,80	1,16	2,15	1,67	8,66	0,53	1,67	0,98
RAS <sup>3</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>0,5</sup>	5,12	2,93	13,92	5,81	85,07	1,97	7,59	2,44
PST <sup>4</sup> (%)	10,62	16,18	29,95	12,09	63,82	7,96	28,87	9,88
Coleta Janeiro de 2010								
pH	7,87	7,83	8,29	7,53	8,02	9,55	10,33	9,69
CE (dS m <sup>-1</sup> )	1,29	1,02	2,96	0,55	1,03	8,55	3,00	3,50
RAS (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>0,5</sup>	5,38	3,91	19,39	3,17	4,88	61,04	15,04	56,83
PST (%)	13,03	4,97	16,16	3,78	2,63	45,49	43,66	84,61
Coleta Julho de 2010								
pH	7,83	7,83	7,88	7,55	7,78	6,99	7,48	10,30
CE (dS m <sup>-1</sup> )	0,60	1,42	2,29	1,35	1,78	1,90	3,18	10,25
RAS (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>0,5</sup>	3,23	6,35	5,37	3,79	6,65	6,16	9,63	56,20
PST (%)	4,08	9,80	6,42	5,29	6,00	9,31	29,48	53,00
Coleta Janeiro de 2011								
pH	8,08	8,68	7,49	5,50	7,48	8,07	9,40	9,20
CE (dS m <sup>-1</sup> )	0,53	0,93	1,01	2,30	6,45	4,46	8,96	15,73
RAS (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>0,5</sup>	2,44	4,33	2,43	3,86	18,33	9,49	44,26	86,57
PST (%)	2,96	5,52	3,74	4,74	36,03	18,44	66,80	45,33

<sup>1</sup>pH em água (1:2,5); <sup>2</sup>Condutividade elétrica do extrato de saturação; <sup>3</sup>Relação de adsorção de sódio; <sup>4</sup>Percentagem de sódio trocável.

Baseando-se na classificação do USSL Staff (1954), observa-se que o grupo 2 (lotes 5, 11 e 14), o grupo 3 (lotes 32, 50 e 42) e o grupo 7 (lotes 36, 46 e 41) na primeira coleta apresentam solos classificados como sódicos, o que corresponde a 16% dos lotes do perímetro irrigado (Tabela 3). Nos solos sódicos a infiltração da água é muita baixa e o controle da salinidade é um grande problema associado a esses solos (Queiroz et al., 2010). A baixa concentração de sais solúveis e elevado valor de pH neste tipo de solos podem promover toxidez direta às plantas devido à ação direta do Na<sup>+</sup>.

Apenas os solos do grupo 5 foram classificados como salino-sódicos, sendo composto por dois lotes na primeira coleta, o 53 e o 54, pois a CE só superou o limite de salinidade nos solos destes lotes (Tabela 3, Figura 3).

Contudo, verificou-se que os problemas neste perímetro irrigado estão relacionados mais com os altos teores de Na<sup>+</sup> trocável, que refletem na PST dos solos. Para a primeira coleta de solos (Julho 2009), foram encontrados

solos com PST superior a 15%, limite preconizado pelo USSL Staff (1954), nos lotes dos grupos 2, 3, 5 e 7, correspondendo a 20% dos lotes do Perímetro. No entanto Freire et al. (2003a) observaram que valores de PST inferiores a 15% já proporcionam degradação de solos similares aos deste Perímetro em Pernambuco. Se avaliarmos os solos com PST superior a 10,0% nesta coleta (Tabela 3), mais de 50% dos lotes estão acima destes valores de PST, o que torna preocupante o uso agrícola destas áreas.

Vários resultados encontrados na literatura tem indicado efeito do  $\text{Na}^+$  sobre a estrutura do solo mesmo com níveis inferiores aos 15% de PST para solos sódicos, inclusive, para Pizarro (1985) parece ser mais importante considerar como sódicos solos com  $\text{PST} > 7\%$ . Pela classificação de Pizarro (1985), todos os oito grupos de solos deste perímetro irrigado na coleta de Julho de 2009 estariam com problemas de sodicidade, indo de ligeiramente sódicos ( $\text{PST}$  entre 7 - 10%) até excessivamente sódicos ( $\text{PST} > 30\%$ ).

Nas demais coletas de solo (Janeiro 2010, Julho 2010 e Janeiro 2011), alguns resultados dos grupos foram alterados, em função de modificações provenientes de regime hídrico da região de localização do Perímetro. Entretanto, as observações foram praticamente as mesmas, em que a sodicidade foi mais intensa do que a salinidade (Tabela 3). Nas amostras de solo de todas as coletas realizadas os sais de  $\text{Na}^+$  estão presentes em proporções consideráveis em quase todos os lotes, tornando-os mais propensos a problemas na estrutura, como diminuição da permeabilidade ao ar e à água, que interferem na produção das culturas.

## **4.2. Atributos físicos dos solos do Perímetro Irrigado**

### **4.2.1. Estatística descritiva dos atributos físicos dos solos**

Analisando a composição granulométrica média dos solos dos 55 lotes do Perímetro Irrigado em questão, observou-se o predomínio da fração areia, mais especificamente da areia fina em relação à areia grossa (Tabela 4). Verificou-se uma grande variabilidade nos lotes do Perímetro, com resultados de areia total variando de 4,61% a 89,23%, com valores médios em torno de 60%.

Os teores de silte e argila ficaram, em média, em torno de 20% nas três camadas avaliadas, oscilando entre 3,84 e 52,79% para silte e 6,92 e 64,78% para argila. Esta oscilação é refletida nos coeficientes de variação, os quais ficaram acima de 40%. Levando-se em consideração os critérios de classificação para o coeficiente de variação proposto por Warrick & Nielsen (1980), verificou-se que as variáveis areia total, silte e argila apresentaram média variabilidade.

A fração silte foi a de maior coeficiente de variação, superando a variação das frações areia total e argila. Resultados semelhantes foram encontrados por Santos et al. (2012), os quais avaliaram os atributos físicos em solos de um vale aluvial e sua variabilidade no semiárido do estado de Pernambuco e verificaram o mesmo comportamento para o silte em relação a areia e argila. Para estes autores esta maior variabilidade para o silte pode estar relacionada com sua maior mobilidade no solo e deposição na planície aluvial.

Apesar das variações da composição granulométrica dos solos estudados apresentarem os maiores valores de CV entre os atributos físicos dos solos estudados (Tabela 4), com valores médios em torno de 58%, 54%, 47% para areia grossa, silte e argila, respectivamente, estes valores apresentam média variabilidade, levando-se em consideração os critérios de classificação para o CV proposto por Warrick & Nielsen (1980).

Foram observadas oscilações nos valores da variável densidade do solo dentro dos lotes do perímetro estudado, ocorrendo desde valores mínimos da ordem de  $1,06 \text{ g cm}^{-3}$  até valores máximos de  $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ . Verifica-se que o menor valor encontrado para densidade do solo ( $1,06 \text{ g cm}^{-3}$ ) foi nas amostras coletadas a 0-10 cm, na superfície do solo. Já os maiores valores de densidade ( $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ ) foram encontrados na maior profundidade (30-60 cm). Os valores de densidade dos solos, segundo Klein (2008), variam de 0,9 a  $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ , dependendo da textura e do teor de matéria orgânica do solo, resultados estes encontrados na área em estudo. O coeficiente de variação para esta variável ficou em torno de 7,0%, resultados considerados baixos segundo Warrick & Nielsen (1980), por serem inferiores a 10%. Para Klein (2008), esta baixa variabilidade permite que, com reduzido número de amostras, se obtenha uma boa representatividade desta propriedade na avaliação de um solo.

Tabela 4 - Medidas estatísticas descritivas dos atributos físicos dos solos nos 55 lotes do Perímetro Irrigado de Custódia (PE), em função da profundidade dos solos

Atributos físicos	Camada (cm)	Análise descritiva			
		Média	Mínimo	Máximo	CV (%)
Areia grossa %	0-10	21,63	2,88	44,08	45,99
	10-30	20,93	2,59	47,09	57,14
	30-60	19,57	2,11	61,67	71,64
Areia fina %	0-10	38,77	3,25	57,64	33,62
	10-30	36,68	2,87	59,98	39,58
	30-60	36,73	2,50	68,34	45,85
Areia total %	0-10	60,40	6,13	82,35	28,87
	10-30	57,61	5,79	86,71	34,04
	30-60	56,30	4,61	89,23	38,05
Silte %	0-10	19,64	7,29	52,79	52,34
	10-30	20,02	4,13	48,88	53,43
	30-60	20,66	3,84	49,60	56,37
Argila %	0-10	19,95	8,59	41,98	40,91
	10-30	22,36	7,35	64,78	48,71
	30-60	23,03	6,92	52,12	50,40
Densidade do solo g cm <sup>-3</sup>	0-10	1,47	1,06	1,70	7,75
	10-30	1,54	1,34	1,76	6,02
	30-60	1,58	1,31	1,80	6,87
Densidade de partículas g cm <sup>-3</sup>	0-10	2,59	2,47	2,67	1,41
	10-30	2,60	2,50	2,74	1,88
	30-60	2,59	2,26	2,74	2,25
Argila dispersa em água %	0-10	8,73	2,04	16,36	35,02
	10-30	10,10	3,63	25,50	38,73
	30-60	10,91	3,26	28,03	49,61
Grau de dispersão %	0-10	45,03	23,21	87,65	22,59
	10-30	48,51	21,18	96,25	26,78
	30-60	49,10	27,48	77,22	20,66

CV: coeficiente de variação

Andrade et al. (2005) desenvolveram trabalho em um solo aluvial na Estação Experimental da Embrapa Algodão, município de Souza - PB com o objetivo de estudar a variabilidade espacial da densidade do solo. Foram feitas amostragens em 40 pontos em uma área de 17 ha. A densidade do solo avaliada nas três profundidades estudadas apresentou baixos valores de coeficiente de variação, indicando pouca variação da densidade do solo com o aumento da profundidade. Os resultados apresentaram valores de 1,52, 1,52 e 1,50 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente, para as camadas de 0-30, 30-60 e 60-90 cm, semelhantes aos encontrados no Perímetro Irrigado de Custódia, que variaram de 1,47, 1,54 e 1,58 g cm<sup>-3</sup> nas camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm.

Quanto à densidade das partículas ( $D_p$ ), o coeficiente de variação abaixo de 2,25% comprova uma menor oscilação desta variável quando comparada às demais. Estes baixos valores demonstram uma grande homogeneidade desta variável na área em estudo. Resultados semelhantes foram obtidos por Mesquita et al. (2003), tanto para densidade do solo, quanto para densidade das partículas, que caracterizaram as variáveis físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico visando indicar a melhor forma e parâmetros para representação destas variáveis. Estes autores encontraram valores de coeficiente de variação da ordem de 7,0 e 2,0% para densidade do solo e partículas, respectivamente.

A argila dispersa em água aumentou em profundidade, o que pode estar relacionado com o processo de migração de coloides no perfil do solo, principalmente na presença de  $\text{Na}^+$  solúvel e trocável, discutidos anteriormente. O elemento Na promove a dispersão das partículas coloidais que, uma vez dispersas, são conduzidas no perfil do solo e se acumulam em subsuperfície, podendo acarretar a formação de camadas de impedimento. Observou-se uma variabilidade nos dados, encontrando desde valores de 2,04 %, considerados baixos, até valores de 28,03 %, os quais são considerados elevados e causam diversos problemas nos solos, tornando-os inadequados para o cultivo. Os coeficientes de variação para esta variável foram médios nas três profundidades estudadas. Comportamento semelhante foi encontrado para o grau de dispersão, aumentando em profundidade.

Corrêa et al. (2010) verificaram que os atributos físicos avaliados (composição granulométrica, densidade do solo e das partículas, argila dispersa em água e grau de dispersão) apresentaram alterações passíveis de comprometer, futuramente, a qualidade dos solos agrícolas devido ao manejo adotado no Perímetro Irrigado Icó-Mandantes. Fato semelhante foi observado no Perímetro Irrigado de Custódia, em que as propriedades físicas indicaram migração de partículas finas e acúmulo em camadas subsuperficiais, podendo contribuir para a diminuição da infiltração de água no solo.



### 4.3. Atributos químicos da água utilizada no Perímetro Irrigado.

#### 4.3.1. Estatística descritiva dos atributos químicos da água.

As águas utilizadas no Perímetro Irrigado de Custódia coletadas em quatro épocas distintas variaram entre lotes e entre as épocas de coleta (Tabela 5). Essa variação nas características das águas, principalmente quando os teores de sais são mais elevados pode afetar a qualidade do solo, além de prejudicar as culturas implantadas nas áreas.

Analisando os valores de pH das águas nas quatro épocas coletadas, verificou-se uma variação entre mínimo e máximo de 6,53 e 9,20, respectivamente. No entanto, quando se comparam as médias, verifica-se que o pH oscilou entre 7,20 e 8,12. Desta forma, considerando os valores médios de pH observa-se que estiveram dentro dos limites considerados normais (6,5 a 8,4) por Ayers & Westcot (1999). Resultados semelhantes foram obtidos por Mendes et al. (2008), avaliando a qualidade das águas utilizadas nas áreas agrícolas do município do Congo – PB, os quais verificaram que os valores de pH das águas coletadas no período chuvoso (Maio/2006) e seco (Dezembro/2006), oscilaram entre 7,56 e 8,05 nas 17 amostras analisadas.

A condutividade elétrica das águas utilizadas no Perímetro Irrigado de Custódia variou entre 140,0 e 1430,6  $\mu\text{S cm}^{-1}$  nas quatro coletas realizadas, encontrando-se desde águas adequadas para irrigação, sem nenhum problema de salinidade ( $< 700 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) até com moderado problema de salinidade (700-3000  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), segundo Ayers & Westcot (1999). Para estes autores, algumas culturas apresentam queda na produção com estes valores de 1430,6  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , como cenoura, cebola, feijão *Phaseolus*, bananeira, abacateiro etc. Porém, para outras culturas como tomateiro, arroz, sorgo, algodoeiro, estas águas podem ser utilizadas sem nenhum risco na queda de produção, desde que manejadas corretamente. Sendo assim, a condutividade elétrica dessas águas está em sua maioria abaixo da faixa de risco de salinidade para muitas culturas de valor econômico.

Tabela 5 - Medidas estatísticas descritivas dos atributos químicos das águas coletadas no Perímetro Irrigado de Custódia (PE), em função da época de coleta

	pH <sup>1</sup>	CE <sup>2</sup> μS cm <sup>-1</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	RAS <sup>3</sup> (mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>0,5</sup>
Coleta Julho de 2009 (13 amostras)										
Média	7,74	554,68	2,77	0,17	1,59	1,09	2,40	0,10	12,90	2,23
Mínimo	7,11	169,03	0,36	0,09	0,76	0,36	0,80	0,00	6,20	0,48
Máximo	8,20	1430,60	8,19	0,28	2,44	2,72	7,80	0,70	24,00	5,35
CV (%)	4,59	64,56	78,66	35,38	36,85	62,74	77,36	168,18	45,19	61,05
Coleta Janeiro de 2010 (13 amostras)										
Média	7,20	545,04	2,63	0,16	1,54	1,05	2,20	0,10	10,90	2,15
Mínimo	6,53	177,14	0,49	0,01	0,52	0,12	0,40	0,00	3,60	0,56
Máximo	8,12	1185,90	6,75	0,36	2,96	3,00	6,20	0,60	20,20	3,91
CV (%)	6,78	47,68	60,68	53,41	48,75	72,21	68,14	139,97	46,65	41,48
Coleta Julho de 2010 (13 amostras)										
Média	7,82	746,31	4,18	0,19	2,09	1,69	3,70	0,20	17,20	2,99
Mínimo	7,20	367,10	1,68	0,11	1,32	0,92	2,00	0,00	11,20	1,51
Máximo	8,50	1253,00	8,47	0,30	2,92	2,52	6,00	0,90	30,40	5,20
CV (%)	4,34	38,83	44,07	27,79	25,71	35,01	38,50	113,80	35,14	33,82
Coleta Janeiro de 2011 (13 amostras)										
Média	8,12	843,91	4,19	0,16	1,57	1,61	3,90	0,10	3,30	3,17
Mínimo	6,76	140,00	0,22	0,02	0,52	0,24	0,40	0,00	1,20	0,36
Máximo	9,20	1260,00	8,32	0,25	2,96	3,00	6,20	0,60	20,20	6,01
CV (%)	7,74	40,37	55,06	45,21	36,05	50,59	50,55	226,12	154,2	47,45

<sup>1</sup>pH em água; <sup>2</sup>Condutividade elétrica da água; <sup>3</sup>Relação de adsorção de sódio; CV: coeficiente de variação.

Em relação aos cátions presentes nas águas, em média, o íon Na<sup>+</sup> é o que predomina nos períodos avaliados. Os teores médios dos cátions nas águas em uma sequência decrescente foi de Na<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> em praticamente todos os períodos avaliados, confirmando os resultados obtidos por Medeiros (1992) e por Mendes et al. (2008) para a composição das águas provenientes da região semiárida nordestina.

Com a predominância do íon Na<sup>+</sup> nas águas do perímetro, observam-se valores médios de 2,63 até 4,19 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> nas quatro épocas de coleta, chegando a valores máximos de 8,47 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>. Para Ayers & Westcot (1999) o limite de concentração de Na<sup>+</sup> em água, para que não ocorra toxicidade às plantas é de 3,0 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>, tanto para irrigação por aspersão quanto por superfície. Desta forma, boa parte das águas utilizadas no perímetro encontra-se com risco moderado (3,0–9,0 mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>) de toxicidade por Na<sup>+</sup> para as plantas. Sendo assim, é necessário um manejo correto destas águas para que não ocorram problemas sérios nos solos e, conseqüentemente, na produção das culturas. Macedo & Menino (1998) afirmam que a toxidez específica do Na<sup>+</sup>

acima de  $3,0 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  pode limitar a absorção de água pelos vegetais, através do floema e xilema de maneira sempre crescente, principalmente devido ao sistema de irrigação utilizado.

A respeito dos ânions, o íon  $\text{HCO}_3^-$  predomina nas águas, independente do período coletado. Em uma sequência decrescente dos ânions nas águas têm-se  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-}$ , nos quatro períodos estudados, variando dentro do Perímetro Irrigado. Na área estudada algumas fontes de água apresentaram restrição quanto ao uso para a irrigação pela presença de  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$ , com valores superiores a  $0,1 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  e  $10,0 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ , respectivamente.

Quanto ao íon  $\text{Cl}^-$ , observou-se que a maioria das amostras de água continham valores superiores a  $3,0 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ , limite este, segundo Ayers & Westcot (1999), crítico para que ocorra toxicidade às plantas. Da mesma forma, Fernandes et al. (2009), avaliando as características das águas utilizadas para irrigação no Perímetro Irrigado Cachoeira II em Serra Talhada – PE, avaliadas em quatro épocas diferentes, verificaram que nenhuma das amostras de água apresentou valores inferiores a  $3,0 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ , acreditando que perdas constantes na produção de culturas, relatadas pelos irrigantes, possam estar relacionadas com a alta concentração de  $\text{Cl}^-$  nas águas.

Para as culturas, a toxicidade do íon  $\text{Na}^+$  é avaliada por meio dos valores de relação de adsorção de sódio (RAS). Levando-se em consideração os resultados obtidos nas análises das águas coletadas nos quatro períodos avaliados, pode-se afirmar que a maioria não apresentou restrição ao uso ( $\text{RAS} < 3,0$ ), porém algumas amostras apresentaram restrição, variando de ligeira a moderada ( $3,0 < \text{RAS} < 9,0$ ), segundo Ayers & Westcot (1999). A RAS é uma relação entre o teor de  $\text{Na}^+$  e a raiz quadrada da soma dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , havendo elevação nos teores do  $\text{Na}^+$ , o aumento da RAS dependerá da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e de  $\text{Mg}^{2+}$ , sendo assim, pode-se, de certa forma, explicar a desuniformidade dos resultados desta variável entre as épocas de coleta. Na maioria das águas, observou-se que a RAS aumentou juntamente com o  $\text{Na}^+$ . Para Freire et al. (2003b) este comportamento sugere prováveis problemas de sodificação de solos irrigados com estas águas.

Assim, o uso de algumas das águas disponíveis para irrigação no Perímetro Irrigado de Custódia pode comprometer ainda mais a qualidade dos solos, degradando-os, como já vem ocorrendo em alguns lotes. Diante da indisponibilidade de outras fontes hídricas de melhor qualidade, é preciso traçar

um plano de manejo adequado que propicie o correto balanço de sais no solo, evitando seu acúmulo.

#### **4.4. Atributos químicos do solo do experimento em campo**

Durante os 18 meses de avaliação do experimento, verificaram-se variações nas propriedades do solo em função dos tratamentos e do período de coleta. Esta variação também deve estar relacionada com a sazonalidade das precipitações pluviais (Figura 1) e elevadas taxas de evapotranspiração na área em estudo.

Os valores de pH em água e pH no extrato de saturação não foram alterados pela aplicação dos tratamentos nas três profundidades estudadas, porém, observa-se um aumento dos valores de pH com o aumento da profundidade, encontrando-se valores, em sua maioria, alcalinos (Tabela 6). Este aumento do pH em profundidade caracteriza-se como um fator negativo para o desenvolvimento das plantas, pois considera-se que a faixa ideal para a maioria das culturas está entre 6,0 e 6,5, faixa na qual os nutrientes encontram-se mais disponíveis, favorecendo melhores produtividades.

Nos solos afetados por sais, o pH atinge valores próximos da neutralidade ou na faixa alcalina, indicando a predominância de íons  $\text{OH}^-$  em relação aos  $\text{H}^+$ . Este é um dos fatores que afeta a predisposição do solo em dispersar, além de causar deficiências de alguns micronutrientes às plantas. Os valores médios encontrados para pH do solo e da pasta saturada atingiram valor máximo na camada de 30-60 cm de 8,63 (pH do solo) e de 8,72 (pHes), contudo, foram verificados alguns valores ácidos para pH do solo, inferiores a 7,0, ainda assim mais altos do que a faixa ideal para a maioria das culturas agrícolas (Tabela 6).

Tabela 6 - Valores médios de pH do solo, pH do extrato de saturação, condutividade elétrica, íons solúveis e relação de adsorção de sódio no extrato de saturação dos solos nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm em função dos tratamentos e do período de coleta do solo

Efeito	pH <sub>a</sub> <sup>1</sup>	pH <sub>es</sub> <sup>2</sup>	CE <sub>es</sub> <sup>3</sup>	Elementos solúveis				Cl <sup>-</sup>	RAS <sup>4</sup>
				Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>		
Tratamento			dS m <sup>-1</sup>	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>				cmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	(mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>0,5</sup>
<b>Profundidade de 0-10 cm</b>									
Testemunha	7,18A	7,58A	5,46A	50,13A	0,81B	11,79B	7,40B	5,52A	14,48A
Atriplex	7,12A	7,57A	1,89B	20,63A	0,49B	6,73B	4,42B	1,25A	8,98A
Esterco bovino	7,36A	7,84A	5,80A	45,10A	1,65A	10,65B	8,60B	5,88A	17,30A
Esterco ovino	7,38A	8,12A	3,45B	33,54A	1,35A	14,05B	9,65B	2,69A	9,21A
Gesso	6,79A	7,57A	8,23A	64,95A	0,75B	38,07A	17,80A	7,24A	11,45A
Polímero	6,92A	7,73A	2,91B	29,99A	0,58B	9,94B	5,28B	2,37A	10,14A
CV (%)	9,15	8,31	111,07	107,06	85,74	60,37	80,58	160,68	138,77
<b>Coleta</b>									
Outubro/2009	7,24B	7,57B	4,30A	26,20B	0,91B	17,15A	13,02A	4,83A	6,99B
Abril/2010	7,12B	8,50A	6,16A	87,30A	0,88B	19,60A	11,40A	4,12A	23,49A
Outubro/2010	6,39C	7,27B	5,31A	33,47B	1,35A	12,96B	6,90B	5,93A	11,57B
Abril/2011	7,75A	7,61B	2,73A	15,92B	0,62B	11,11B	4,10B	1,75A	5,65B
<b>Profundidade de 10-30 cm</b>									
Testemunha	7,87A	7,82A	9,31A	104,47A	0,17A	12,86A	9,07B	10,41A	34,03A
Atriplex	7,72A	7,59A	3,77B	31,64B	0,16A	8,04B	4,74B	2,90B	13,41A
Esterco bovino	7,84A	7,85A	7,56A	75,21A	0,17A	14,30B	8,44B	7,69A	22,04A
Esterco ovino	7,72A	8,18A	4,65B	54,66B	0,21A	11,40B	7,07B	4,87B	19,23A
Gesso	7,19A	7,37A	10,15A	88,18A	0,21A	30,46A	17,94A	9,37A	17,92A
Polímero	7,98A	7,83A	4,75B	50,93B	0,17A	8,35B	4,62B	4,48B	19,13A
CV (%)	11,96	9,55	87,65	94,99	48,11	77,42	78,57	108,59	99,59
<b>Coleta</b>									
Outubro/2009	7,82B	7,56B	6,03A	50,95B	0,17B	15,06A	8,9A	8,19A	15,41B
Abril/2010	7,68B	8,61A	9,77A	134,64A	0,24A	17,97A	12,31A	8,54A	37,15A
Outubro/2010	7,02C	7,37B	5,66A	46,23B	0,17B	8,85A	4,89B	5,10A	18,02B
Abril/2011	8,35A	7,55B	5,33A	38,23B	0,15B	15,06A	8,49A	4,64A	13,24B
<b>Profundidade de 30-60 cm</b>									
Testemunha	8,43A	7,80A	10,14A	117,62A	0,14A	10,54B	7,93A	11,06A	40,64A
Atriplex	8,25A	7,76A	3,73B	42,67A	0,19A	5,07B	3,15A	3,19A	22,68A
Esterco bovino	8,17A	7,75A	9,15A	99,06A	0,15A	13,11A	8,16A	9,46A	30,28A
Esterco ovino	8,50A	8,15A	5,06B	67,81A	0,15A	9,72B	7,30A	5,82A	31,06A
Gesso	7,73A	7,37A	9,11A	83,12A	0,31A	16,80A	10,51A	9,49A	24,51A
Polímero	8,56A	7,96A	5,56B	66,98A	0,14A	6,97B	3,87A	5,49A	30,98A
CV (%)	11,90	10,71	88,47	98,53	109,21	90,12	107,79	108,40	90,40
<b>Coleta</b>									
Outubro/2009	8,41A	7,65B	6,66A	62,75B	0,23A	11,59A	9,20A	9,53A	20,40B
Abril/2010	8,40A	8,72A	8,76A	143,84A	0,21A	9,15A	6,67A	7,87A	54,81A
Outubro/2010	7,67B	7,41B	6,17A	53,50B	0,16A	7,13A	4,20A	5,79A	23,57B
Abril/2011	8,63A	7,42B	6,91A	58,09B	0,12A	13,60A	7,22A	6,49A	21,32B

<sup>1</sup>pH em água (1:2,5); <sup>2</sup>pH do extrato de saturação; <sup>3</sup>Condutividade elétrica do extrato de saturação; <sup>4</sup>Relação de adsorção de sódio. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, entre os tratamentos e o período de coleta.

Dos tratamentos aplicados no experimento, verificou-se que o que pode ter promovido uma leve redução no pH do solo nas três profundidades

estudadas foi o gesso. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Vital et al. (2005), trabalhando com a aplicação de níveis crescentes de gesso e fósforo sobre alguns atributos do solo e sobre a disponibilidade de fósforo no solo, os quais verificaram que a aplicação de gesso, no nível mais elevado, ocasionou ligeira acidificação do solo. Estes autores afirmam que na presença de gesso, o  $\text{Ca}^{2+}$  substitui o  $\text{Na}^+$  trocável e, através da lixiviação pela água de irrigação, são removidos os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{OH}^-$ , causando decréscimo no pH e no teor de  $\text{Na}^+$  do solo.

Resultados semelhantes foram encontrados também por Ruiz et al. (2004), trabalhando com parcelamento da lâmina de lixiviação sobre diversas características químicas do extrato da pasta saturada do solo, em amostras de solo com características salino-sódicas, que verificaram que o pH do solo diminuiu em relação aos valores das amostras não tratadas. Para estes autores esta diminuição seria provocada pela aplicação do gesso, em virtude da substituição do  $\text{Na}^+$  adsorvido pelo  $\text{Ca}^{2+}$  do corretivo, além da precipitação dos carbonatos de  $\text{Na}^+$  existentes.

No entanto, os valores de pH em água e pHes diferiram entre os períodos de coleta nas três profundidades estudadas, sendo o mês de Outubro/2010 o de menores valores de pH de todas as épocas de avaliação.

Mesmo com o pouco tempo para um experimento de fitorremediação e aplicação de corretivos químicos e orgânicos em campo, foram verificadas diferenças na solução do solo em função dos tratamentos aplicados. Para a CEes houve efeito significativo com a aplicação dos tratamentos nas três profundidades coletadas e ocorreu um acréscimo nos valores de CEes com o aumento da profundidade (Tabela 6).

Na camada superficial (0-10 cm) houve redução da CEes com a aplicação dos tratamentos, especialmente o cultivo de *Atriplex nummularia*, seguido do uso do polímero e do esterco ovino, chegando a valores abaixo do limite que classifica os solos como salinos, que é de  $4,0 \text{ dS m}^{-1}$  (USSL Staff, 1954).

Esta eficiência da *Atriplex nummularia* em reduzir os teores de CEes em solos afetados por sais foi relatada por Azevedo et al. (2005), trabalhando com rejeito de dessalinizador na irrigação de *Atriplex nummularia*, que verificaram uma redução da CEes do solo, tornando-o, portanto, menos salino que nos vasos em que a planta não foi cultivada. Da mesma forma Krishnapillai &

Ranjan (2005), cultivando *Atriplex patula* em vasos com o objetivo de verificar o potencial de redução de sais da zona radicular observaram uma redução da CEes de 145 para 48 dS m<sup>-1</sup> em apenas 150 dias de cultivo. Desta forma, verifica-se um grande potencial destas plantas em reduzir os efeitos causados pelos excessos de sais no solo.

No entanto, experimentos em ambiente controlado e em vasos, como estes relatados, diferem das condições deste trabalho, por ter sido em campo. Nesta situação, as plantas têm a capacidade de desenvolver seu sistema radicular radialmente e em profundidade, atuando em camadas mais profundas do que corretivos e amenizantes. Observou-se que o cultivo da *Atriplex nummularia* por apenas 18 meses refletiu na redução da CEes para valores inferiores ao limite de 4,0 dS m<sup>-1</sup> até a terceira camada avaliada (30-60 cm), apesar de ser um sistema aberto, com entradas de sais que realimentam a salinidade deste solo.

A redução dos valores de CEes do solo com a aplicação de polímero foi mais eficiente na camada de 0-10 cm do que o uso dos esterco e do gesso. Sabe-se que o uso dos polímeros em solos contribui para a melhoria das propriedades físicas, melhorando a estabilidade dos agregados e a condutividade hidráulica, tendo em vista uma melhor eficiência no uso de água, aumentando a permeabilidade. Desta maneira, a melhoria das características físicas do solo na camada mais superficial deve ter favorecido uma maior percolação dos sais para camadas mais profundas, diminuindo assim a CEes na superfície.

A utilização de esterco ovino, mesmo não sendo considerado corretivo químico, exerceu efeitos positivos na redução da CEes, sendo mais eficiente do que o esterco bovino e o gesso. Miranda et al. (2011), avaliando a influência do uso de diferentes condicionadores químicos e orgânicos em um Neossolo Flúvico salino-sódico similar a este solo, por um período de 70 dias em experimento em casa de vegetação, verificaram uma diminuição da CE após lixiviação do solo tratado com esterco ovino, onde a CE foi reduzida de 12,7 dS m<sup>-1</sup> aos 7 dias de lixiviação para valores inferiores a 2,0 dS m<sup>-1</sup> aos 70 dias de lixiviação.

Diferentemente dos outros tratamentos aplicados, o uso do gesso promoveu aumento na CEes, para valores superiores aos da testemunha nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm. Resultados semelhantes foram encontrados

por Vital et al (2005), os quais observaram um aumento da CE determinado em extrato solo:água de 1:5 no nível máximo de gesso aplicado, cuja causa pode estar relacionada com um aumento na concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  no solo, derivado do gesso, quando se aplicaram 200% da necessidade de gesso, em razão de uma solubilização menor do gesso e de menor lixiviação de sais solúveis, fato este, segundo estes autores, observado em teste de laboratório quando se constatou que os valores da CE aumentaram com a elevação da concentração de gesso contida na solução.

Para Melo et al. (2008), os resultados ocorreram de forma diferente dos encontrados neste trabalho em relação à CEes dos solos. Na pesquisa realizada por estes autores, a CEes dos solos, que era originalmente de 22,40 e 20,20  $\text{dS m}^{-1}$ , foi reduzida para valores máximos de 2,18 e 3,16  $\text{dS m}^{-1}$  para dois tipos de solo, cujos resultados ocorreram em virtude da aplicação do gesso aumentar a quantidade de sais no solo ocasionando a diminuição da dupla camada difusa enquanto a substituição do  $\text{Na}^+$  trocável pelo  $\text{Ca}^{2+}$  floculou as argilas dispersas melhorando a condutividade hidráulica e, em consequência, a lixiviação dos sais solúveis. Porém, vale salientar que neste trabalho, além de ser realizado em laboratório, aplicou-se uma lâmina de água para a lixiviação dos sais.

Quando se comparou a CEes em função dos períodos de coleta verificou-se que não houve diferença significativa nas três profundidades estudadas, porém, os valores mais baixos de CEes nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm ocorreram na última coleta dos solos (Abril/2011), possivelmente pela precipitação pluvial ocorrida neste mês, a qual atingiu 172 mm (Figura 1).

Entre os cátions solúveis avaliados, o  $\text{Na}^+$  foi o de concentrações mais elevadas. Isto se deve à sua maior solubilidade e ao fato de que  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  têm sua solubilidade diminuída à medida que o pH atinge valores mais elevados que possibilitam a formação de  $\text{CaCO}_3$  (Sparks, 1995).

Observou-se que na profundidade de 0-10 e 30-60 cm não houve diferença significativa entre os tratamentos, no entanto, verifica-se uma redução nos teores de  $\text{Na}^+$  solúvel principalmente para o cultivo da atriplex. Já na profundidade de 10-30 cm verificou-se diferença estatística entre os tratamentos, com menores teores de  $\text{Na}^+$  solúvel para os tratamentos de atriplex, polímero e esterco ovino. Observou-se, também, que os valores aumentaram em profundidade, podendo-se considerar que, em geral, as



limitações associadas a estes solos aluviais em ambiente semiárido estão relacionadas à ocorrência de sais solúveis, especialmente  $\text{Na}^+$ , em camadas mais profundas.

Conforme afirmam Azevedo et al. (2005) avaliando o uso de *Atriplex nummularia* na extração de sais de solos irrigados com efluentes salinos, esta espécie foi eficiente na retirada de sais do solo, principalmente de  $\text{Na}^+$  solúvel, sendo uma alternativa para reduzir os efeitos da salinização dos solos. Ao se comparar os períodos de coleta, verificou-se diferença significativa e observou-se que os valores mais baixos de  $\text{Na}^+$  solúvel ocorreram na última coleta nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm. Desta forma, confirma-se uma diminuição dos valores deste elemento aos 18 meses de condução do experimento.

Ao contrário do observado para o  $\text{Na}^+$  solúvel, o  $\text{K}^+$  diminuiu com a profundidade, sendo desta forma um fator negativo ao desenvolvimento das culturas agrícolas, que necessitam de um fornecimento adequado deste nutriente. Os valores de  $\text{K}^+$  ficaram bem abaixo aos de  $\text{Na}^+$ , podendo representar uma limitação à absorção do  $\text{K}^+$  pelas plantas, devido à competição com o  $\text{Na}^+$ , elemento não essencial e tóxico, causando prejuízos ao desenvolvimento vegetal e às propriedades físicas do solo. No entanto, verificou-se uma maior concentração de  $\text{K}^+$  nos solos na camada superficial onde foram aplicados os esterco bovino e ovino, diminuindo assim a relação sódio/potássio e favorecendo a melhoria na qualidade química e física do solo. Da mesma maneira, Holanda et al. (1998) observaram maiores concentrações de  $\text{K}^+$  solúvel na camada mais superficial do solo onde foram adicionados esterco de curral.

O tratamento com aplicação de gesso foi mais efetivo no aumento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm, diferindo dos demais tratamentos. Estes acréscimos nos valores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  evidenciam a capacidade do gesso, apesar de sua baixa solubilidade, em elevar as concentrações destes elementos quando aplicados em solos afetados por sais.

Na avaliação do  $\text{Cl}^-$  e RAS verifica-se que os menores valores ocorreram para o tratamento da atriplex. Este comportamento ocorreu nas três profundidades estudadas, embora ocorressem elevações dos teores com o aumento da profundidade. No entanto, não houve diferença significativa entre os tratamentos, exceto, para o  $\text{Cl}^-$  na profundidade de 10-30 cm. Esta condição esta relacionada com os elevados valores de coeficiente de variação. Desta

forma, além do tratamento de cultivo de atriplex, o tratamento com polímero e aplicação do esterco ovino também promoveram reduções nos teores de  $\text{Cl}^-$ , íon bastante interligado à salinidade de muitos solos do semiárido brasileiro, motivos de toxidez em ambientes salinizados.

Ressalta-se a importância do cultivo da atriplex que, além de reduzir os valores de CEes, dos íons solúveis  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , bem como da RAS, consegue promover a cobertura do solo, protegendo-o em um ambiente inóspito e sujeito à degradação como no semiárido. Desta forma, verifica-se o efeito positivo desta planta fitorremediadora na melhoria dos solos afetados por sais, reduzindo principalmente os elementos mais prejudiciais às plantas, como altas concentrações de  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ .

No geral, os elementos que estão associados aos problemas de salinização dos solos aumentam significativamente em profundidade, sendo a camada de 30-60 cm a mais problemática. Isto é um fator negativo, pois dificulta a infiltração da água pela presença de camadas adensadas de solo em subsuperfície, bem como limita o crescimento radicular das plantas.

Quanto ao período de coleta, foram encontradas oscilações entre as quatro amostragens de solo, possivelmente, em função das diferenças entre tratamentos, já que nesta avaliação foram utilizadas as médias de todos os resultados obtidos em cada época, não importando os tratamentos. Estas alterações também podem ter advindo dos volumes de chuva precipitados nas diferentes épocas de avaliação, pois a passagem de água e os diferentes teores de umidade, dependendo da época de amostragem, influem diretamente nas variáveis associadas à salinidade dos solos pelos efeitos de diluição na época de chuvas e de concentração no período seco.

Na avaliação do extrato de saturação do solo das quatro coletas de solo, na implantação do experimento e aos 6, 12 e 18 meses, nas três profundidades avaliadas, decidiu-se por apresentar os resultados de CEes,  $\text{Na}^+$  e RAS (Figuras 7, 8 e 9), por serem estes os melhores indicadores da presença de excesso de sais solúveis no solo. Estes resultados avaliaram a evolução de cada variável dentro de cada tratamento em função da época de coleta de solo em cada profundidade.

Durante os 18 meses de avaliação do experimento verificaram-se variações nos valores de CEes com o uso dos tratamentos em todas as profundidades (Figura 7). Em geral, observou-se um aumento da CEes entre a

primeira coleta (Outubro de 2009) e a segunda (Abril de 2010), já na terceira (Outubro de 2010) e na quarta coleta (Abril de 2011) houve uma tendência de redução da CEes. Este comportamento ocorreu em todos os tratamentos, inclusive na testemunha, isto pode estar relacionado com as condições climáticas predominantes na região, principalmente as precipitações pluviárias irregulares e a evapotranspiração elevada durante as coletas. No entanto, apesar disso, a CEes não diferiu significativamente entre as coletas dentro de cada profundidade e os valores mais baixos de CEes, em sua maioria, ocorreram na camada superficial, indicando elevação na salinidade em profundidade.

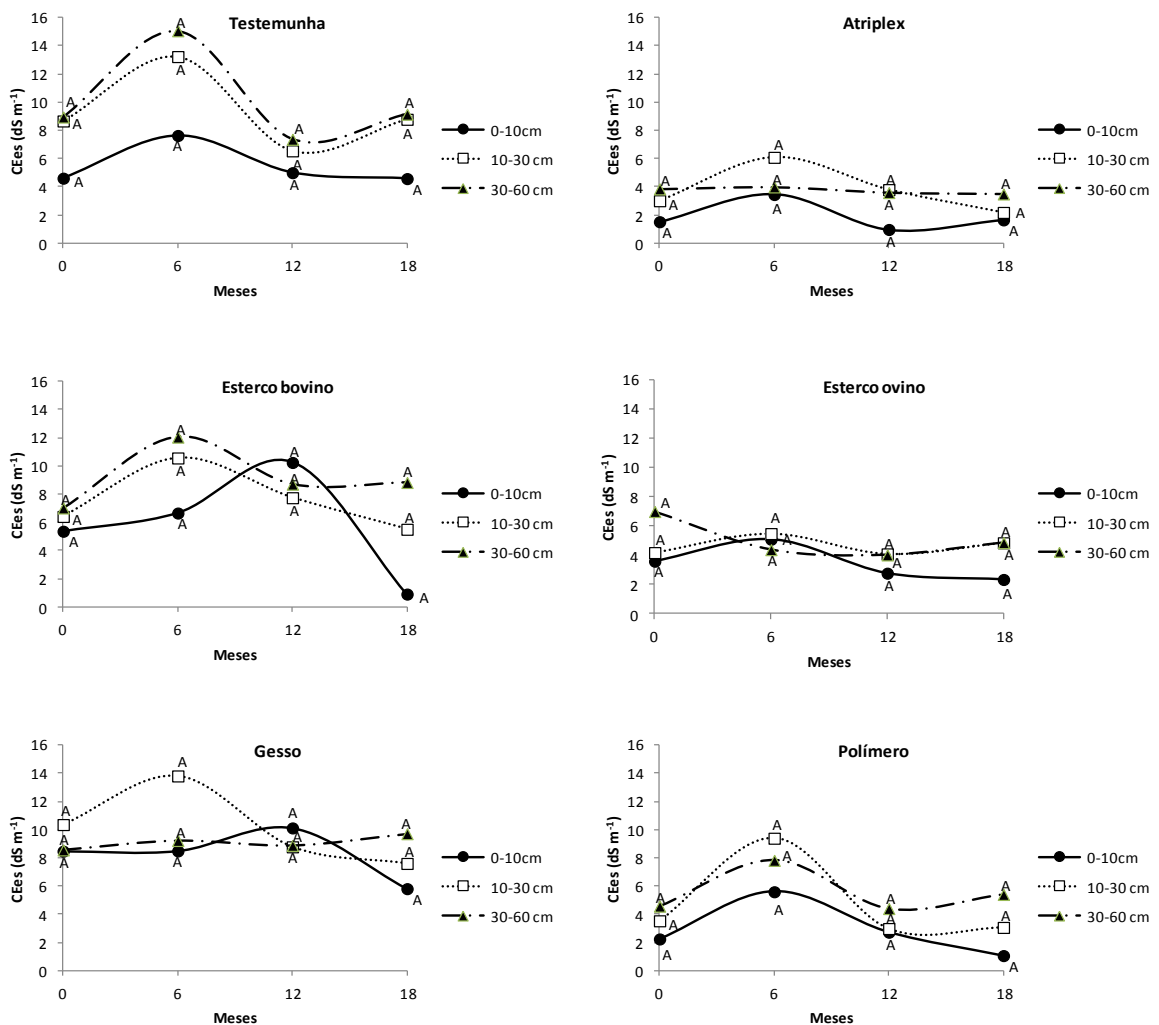


Figura 7 - Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm em função dos tratamentos e da época de coleta (0, 6, 12 e 18 meses). Médias seguidas de letras iguais na mesma profundidade não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, para cada tratamento.

Na última coleta realizada (18 meses), verificou-se que a CEes ficou próxima de  $2,0 \text{ dS m}^{-1}$  na profundidade de 0-10 cm para os tratamentos do cultivo de atríplex, de esterco bovino e ovino e do polímero. Desta forma, pode-se observar a importância da aplicação destes tratamentos na melhoria dos solos afetados por sais, contudo, destaca-se que a reaplicação dos produtos utilizados poderia promover uma maior redução da CEes, que deveria ser confirmada com avaliações por períodos mais longos. Os resultados obtidos pelo uso dos esterco estão de acordo com Cavalcante et al. (2010), os quais afirmam que a adição de matéria orgânica oriunda do esterco de curral a um solo salino-sódico contribui para a redução da salinidade (CEes) e da sodicidade (PST).

Para os resultados com aplicação de gesso, houve uma pequena redução na CEes nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm na última coleta (18 meses), porém os valores ficaram acima de  $4,0 \text{ dS m}^{-1}$ , valor este utilizado para classificação de solos salinos (USSL Staff, 1954). Isto pode ser explicado pelo uso de gesso sem irrigação, dificultando a solubilização do corretivo e sua reação no solo, como justificado por Agra & Cavalcante (1992). Estes autores, analisando o comportamento da incorporação de doses de gesso em um solo salino-sódico sem e com drenagem, verificaram que a aplicação de gesso nos tratamentos sem drenagem, independente da dose aplicada, comprometeram ainda mais o nível salino e sódico em relação ao solo antes da aplicação do corretivo químico. Verificaram, também, que depois da aplicação com a dose de 50% da necessidade de gesso, os valores que antes eram de  $23,4 \text{ dS m}^{-1}$  de CEes passaram para  $40,7 \text{ dS m}^{-1}$  no solo sem drenagem e  $8,5 \text{ dS m}^{-1}$  para o solo com drenagem.

Para Cavalcante et al. (2010), nestes casos ocorre a solubilização do gesso através das irrigações, mas sem a lavagem seguida de drenagem os sais solubilizados que não são lixiviados voltam a ser adsorvidos pelo complexo sortivo do solo. Assim, como a reação entre o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{Na}^+$  é reversível, o  $\text{Na}^+$  volta a dispersar as argilas, piorando as propriedades físicas do solo.

Ao se avaliar as concentrações de  $\text{Na}^+$  solúvel dentro de cada tratamento e em função da época de coleta em cada profundidade, foi encontrada diferença significativa para a maioria dos tratamentos entre os períodos de amostragem (Figura 8). Similarmente à CEes, registraram-se

diferenças nos teores de  $\text{Na}^+$  solúvel nas camadas avaliadas, com aumento em profundidade.

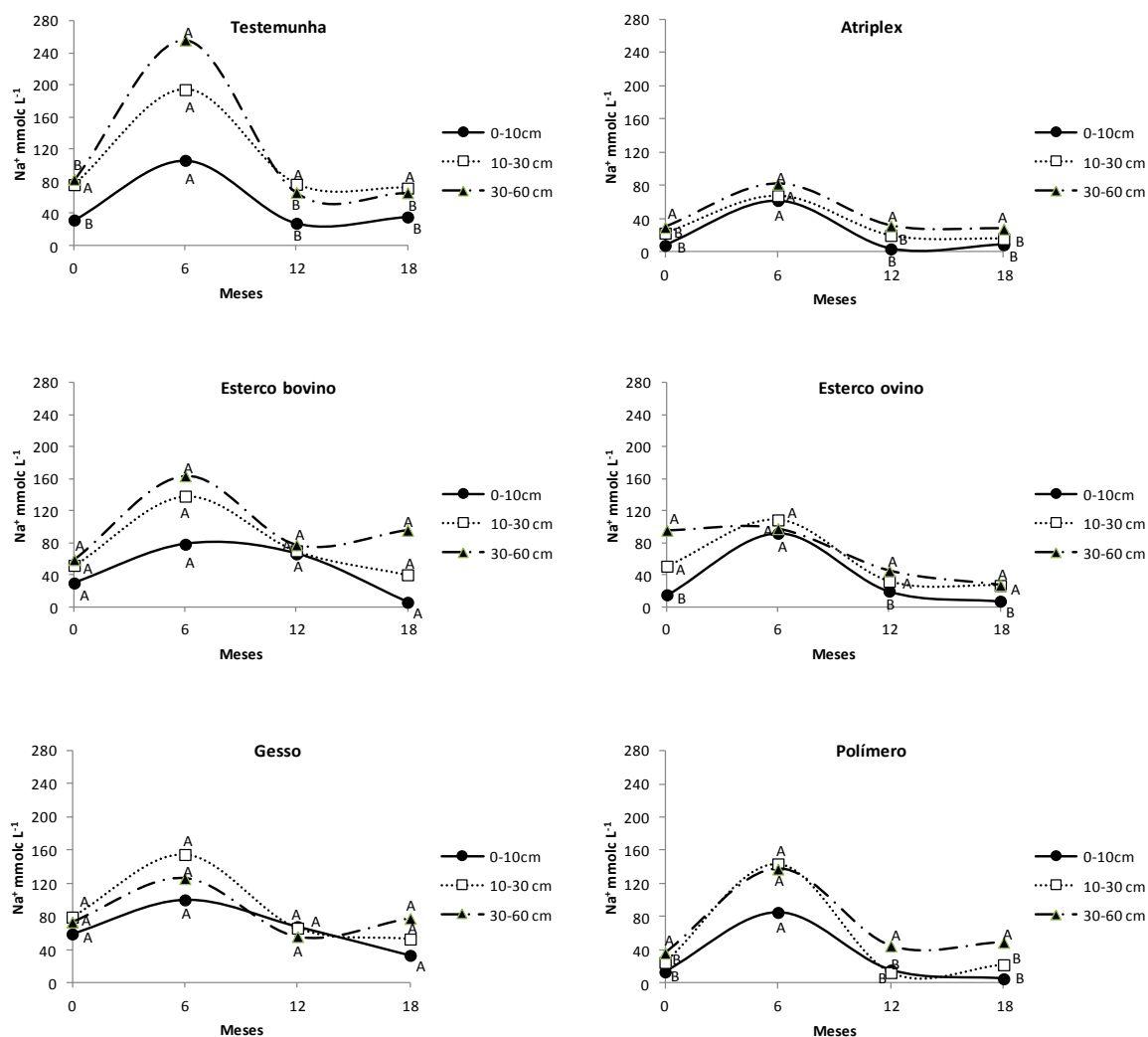


Figura 8 - Sódio solúvel do extrato de saturação do solo nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm em função dos tratamentos e da época de coleta (0, 6, 12 e 18 meses). Médias seguidas de letras iguais na mesma profundidade não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, para cada tratamento.

Semelhante tendência foi observada por Barros et al. (2004), quando estudaram a influência do tamanho das partículas e do método de aplicação do gesso na recuperação de solos afetados por sais, constatando que tanto a concentração de  $\text{Na}^+$  como a RAS aumentaram em profundidade, o que se deve, provavelmente, ao rápido decréscimo da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  em solução, em virtude das reações de troca ocorridas nas camadas mais profundas. Elevados teores de  $\text{Na}^+$  em profundidade pode acarretar um sério problema para o crescimento do sistema radicular das plantas, interferindo diretamente no desenvolvimento e produção da maioria das culturas.

Os maiores teores de  $\text{Na}^+$  solúvel foram observados nas amostras coletadas aos seis meses de implantação do experimento em todos os tratamentos avaliados, período este posterior à baixa incidência de chuvas e, conseqüentemente, sem lixiviação natural dos sais presentes no solo. Por outro lado, verifica-se que na maioria dos tratamentos e quase em todas as profundidades os teores de  $\text{Na}^+$  solúvel foram reduzidos na última coleta (Abril de 2011), época em que a precipitação pluvial foi mais elevada (172 mm) em relação às coletas anteriores.

A RAS acompanhou o mesmo comportamento do  $\text{Na}^+$  solúvel em função dos tratamentos e do período de coleta das amostras de solo nas três profundidades (Figura 9). A relação de adsorção de sódio (RAS) expressa a proporção relativa de sódio que pode ser adsorvida às partículas do solo, passando para a forma trocável. De acordo com Almeida (2010), este índice indica a proporção relativa em que se encontra o  $\text{Na}^+$  em relação ao  $\text{Ca}^{2+}$  e ao  $\text{Mg}^{2+}$ , cátions bivalentes que competem com o  $\text{Na}^+$  pelos sítios de troca iônica do solo. Esta consideração é importante quando há predominância do íon  $\text{Na}^+$ , que poderá induzir trocas de íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  pelos de  $\text{Na}^+$  nos solos, o que pode levar à degradação do mesmo, com a conseqüente perda de sua estrutura e permeabilidade.

Com o aumento da profundidade, a RAS também teve resultados mais elevados em todos os tratamentos aplicados, seguindo a mesma tendência observada pelo  $\text{Na}^+$  solúvel. Para Melo et al. (2008) este comportamento ocorre devido à quantidade de corretivo que atinge as últimas camadas ser menor que na camada superior, em função das substituições iônicas ocorridas na primeira camada, ocasionando maior presença de  $\text{Na}^+$  nas camadas inferiores.

Ocorreu uma pequena diminuição da RAS na camada mais superficial do solo aos 18 meses após aplicação dos tratamentos com esterco bovino, ovino, gesso e polímero. Verifica-se que, nestes casos, os valores foram reduzidos a níveis inferiores ao limite indicado para correção da sodicidade dos solos ( $\text{RAS} > 13$ ). Barros et al. (2005), trabalhando com aplicação de doses de gesso e calcário na recuperação de solos salino-sódicos, verificaram que os tratamentos de 25, 50 e 75% da necessidade de gesso não reduziram a RAS ao valor limite indicado para correção da sodicidade, entretanto, nas doses de 100, 125 e 150% da necessidade de gesso, foi observada a redução da RAS a

níveis inferiores a este limite, em todas as profundidades, indicando a correção da sodicidade desses solos.

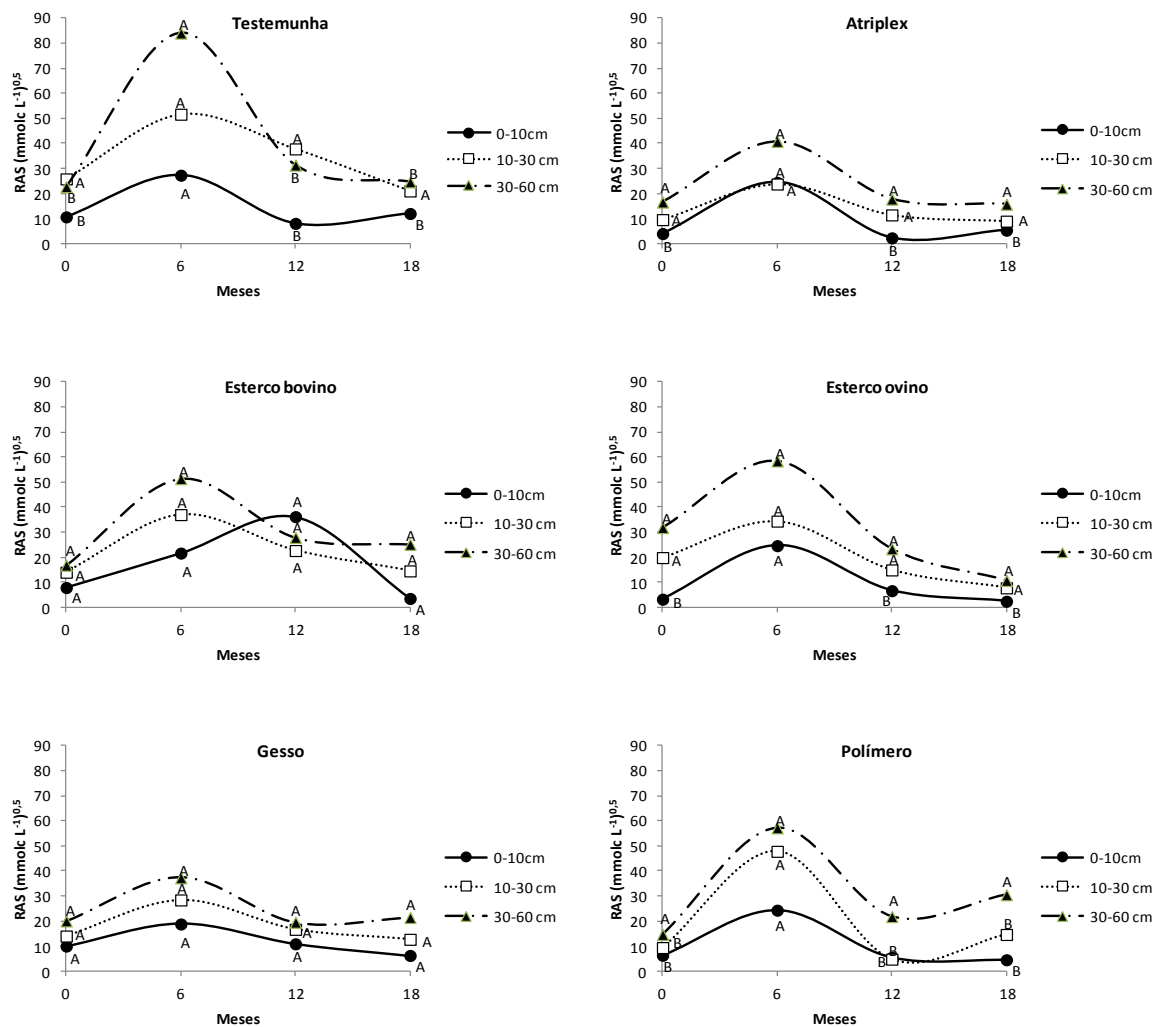


Figura 9 - Relação de adsorção de sódio do extrato de saturação do solo nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm em função dos tratamentos e da época de coleta (0, 6, 12 e 18 meses). Médias seguidas de letras iguais na mesma profundidade não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, para cada tratamento.

Na recuperação de um solo salino-sódico em cultivo rotacionado com arroz e trigo, Abro & Mahar (2007) analisaram cinco tratamentos, lavagem (T1), esterco de curral na dose de 10 t ha<sup>-1</sup> (T2), casca de arroz a 10 t ha<sup>-1</sup> (T3), esterco de curral a 5 t ha<sup>-1</sup> + casca de arroz a 5 t ha<sup>-1</sup> (T4) e gesso 100% da necessidade (T5). Os autores verificaram redução da RAS na ordem: T5 > T4 > T2 > T3 > T1; superioridade nas variáveis, altura de planta, grãos panícula e peso de 1.000 grãos nos tratamentos com esterco de curral seguido do esterco de curral + casca de arroz e maior rendimento de grãos de trigo em kg ha<sup>-1</sup> no

solo tratado com esterco de curral + casca de arroz seguido pelo tratamento lavagem. Verifica-se neste trabalho a importância dos condicionadores na redução do excesso de sais e, conseqüentemente, o aumento da produção das culturas.

Além do comportamento dos sais solúveis estudados no experimento durante os 18 meses com o uso dos tratamentos, verificou-se a composição do solo em termos dos cátions trocáveis  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , além da CTC, PST e COT (Tabela 7). Observou-se que com a aplicação dos tratamentos ocorreu diferença significativa apenas na profundidade de 0-10 cm para  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e COT.

Os teores de  $\text{Na}^+$  trocável, apesar de não diferirem significativamente entre os tratamentos e entre os períodos de coleta, aumentam em profundidade, além de predominarem em relação aos outros cátions. É possível que o pouco tempo decorrido de experimentação não tenha sido suficiente para respostas mais significativas dos tratamentos, especialmente em se tratando de fitorremediação, que exige uma atuação mais prolongada das plantas no solo. Por outro lado, experimentos de campo envolvem sistemas abertos, em que não há o controle da entrada de mais elementos, podendo estar ocorrendo acréscimos de  $\text{Na}^+$  pela própria água do lençol freático da área.

Os menores valores de  $\text{Na}^+$  trocável nas profundidades de 10-30 cm e 30-60 cm foram encontrados nos tratamentos do esterco ovino e da atriplex. Holanda et al. (1998), avaliando o efeito de condicionadores e da subsolagem em algumas características químicas de um solo salino-sódico no Vale do Açu – RN, constataram que, dentre o uso de condicionadores aplicados, o esterco de curral foi benéfico na redução do  $\text{Na}^+$  trocável de um solo salino-sódico, principalmente quando associado à subsolagem e à gessagem. Por outro lado, Leal et al.(2008), avaliando o potencial da *Atriplex nummularia* como planta fitoextratora de  $\text{Na}^+$  do solo em condições de irrigação com águas de diferentes níveis de salinidade e ação do gesso de jazida, obtiveram resultados que indicam a capacidade das plantas de Atriplex em promover o decréscimo no teor de  $\text{Na}^+$  trocável.



Tabela 7 - Valores médios dos teores de cátions trocáveis, capacidade de troca de cátions, percentagem de sódio trocável e carbono orgânico total dos solos nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm em função dos tratamentos e do período de coleta do solo

Efeito	Elementos trocáveis					PST <sup>2</sup>	COT <sup>3</sup>
	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CTC <sup>1</sup>		
Tratamento	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>					%	dag kg <sup>-1</sup>
<b>Profundidade de 0-10 cm</b>							
Testemunha	0,90A	0,40B	0,16B	0,54B	13,09A	6,91A	1,01B
Atriplex	1,02A	0,44B	1,17B	0,64B	13,26A	8,16A	1,11B
Esterco bovino	0,78A	0,66A	1,27B	0,72B	15,01A	5,44A	1,30A
Esterco ovino	0,64A	0,87A	1,52B	0,81B	15,24A	4,16A	1,29A
Gesso	0,98A	0,34B	2,57A	1,23A	13,60A	7,57A	1,01B
Polímero	0,78A	0,44B	1,11B	0,65B	15,13A	5,55A	1,19A
CV (%)	128,33	60,21	34,62	33,19	17,92	142,26	24,49
Coleta							
Outubro/2009	0,83A	0,50B	1,33A	0,82A	14,22	6,31A	1,10B
Abril/2010	0,89A	0,40B	1,60A	0,70A	-	6,53A	1,09B
Outubro/2010	0,60A	0,73A	1,54A	0,74A	-	4,27A	1,07B
Abril/2011	1,07A	0,47B	1,40A	0,80A	-	8,08A	1,34A
<b>Profundidade de 10-30 cm</b>							
Testemunha	3,01A	0,16A	1,02A	0,63A	17,11A	17,01A	0,87A
Atriplex	2,07A	0,19A	1,12A	0,74A	16,20A	12,41A	0,92A
Esterco bovino	2,49A	0,20A	1,26A	0,72A	17,05A	13,80A	0,88A
Esterco ovino	1,73A	0,29A	1,26A	0,81A	16,77A	10,10A	0,92A
Gesso	2,33A	0,14A	1,27A	0,76A	14,11A	16,03A	0,79A
Polímero	2,36A	0,19A	1,31A	0,76A	15,75A	16,33A	0,92A
CV (%)	99,08	81,74	25,86	31,52	17,58	103,13	16,31
Coleta							
Outubro/2009	2,66A	0,18A	1,14A	0,82A	16,16	16,11A	0,76A
Abril/2010	2,42A	0,14A	1,27A	0,64A	-	15,04A	0,89A
Outubro/2010	2,15A	0,21A	1,19A	0,63A	-	12,97A	0,74A
Abril/2011	2,10A	0,25A	1,23A	0,85A	-	12,99A	1,15A
<b>Profundidade de 30-60 cm</b>							
Testemunha	3,85A	0,15A	1,16A	0,63A	15,24A	25,81A	0,73A
Atriplex	2,14A	0,13A	1,04A	0,63A	14,45A	14,56A	0,65A
Esterco bovino	2,99A	0,11A	0,99A	0,64A	14,79A	19,74A	0,59A
Esterco ovino	2,79A	0,14A	1,20A	0,72A	13,43A	20,37A	0,75A
Gesso	2,97A	0,13A	1,09A	0,62A	13,60A	21,61A	0,71A
Polímero	3,18A	0,14A	1,34A	0,74A	12,47A	26,00A	0,73A
CV (%)	92,38	50,63	38,21	29,87	19,67	99,32	26,61
Coleta							
Outubro/2009	2,94A	0,10C	1,00A	0,76A	13,99	20,63A	0,57C
Abril/2010	3,33A	0,08C	1,26A	0,60B	-	24,11A	0,70B
Outubro/2010	2,85A	0,15B	1,13A	0,54B	-	20,18A	0,49C
Abril/11	2,83A	0,20A	1,14A	0,74A	-	20,47A	1,02A

<sup>1</sup>Capacidade de troca de cátions; <sup>2</sup>Percentagem de sódio trocável; <sup>3</sup>Carbono orgânico total. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Scott-knott ao nível de 5% de probabilidade, entre os tratamentos e o período de coleta.

Os baixos teores de K<sup>+</sup> em forma trocável (Tabela 7) e solúvel (Tabela 6) são reflexos do equilíbrio entre cátions do solo, relacionados com os teores de Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> que predominam no sistema. Os teores baixos do K<sup>+</sup> diminuem ainda mais com o aumento da profundidade dos solos. Para os

cátions trocáveis  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , os maiores valores ocorreram com a aplicação do gesso na profundidade de 0-10 cm, principalmente por este fornecer muito  $\text{Ca}^{2+}$  em sua composição química. Entretanto, apesar dos teores mais elevados destes cátions, isso não foi suficiente para reduzir a PST do solo, que permaneceu nos mesmos níveis dos outros tratamentos e em valor característico de solo sódico (acima de 15%) nas profundidades de 10-30 cm e 30-60 cm. E esta PST é mais preocupante em profundidade, chegando a 21,61% no tratamento com gesso.

Mesmo não havendo diferença significativa entre os tratamentos na redução da PST, verificou-se uma leve diminuição da mesma com a aplicação do esterco ovino nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm. Desta mesma forma, Neves (1997) estudou o efeito da adição da matéria orgânica obtida do esterco de curral em um solo salino-sódico e verificou que o mesmo contribuiu para a redução da PST. Observou-se que dentre as doses aplicadas de esterco, a maior redução da PST ocorreu na dose de  $30 \text{ t ha}^{-1}$ . Para este mesmo autor, os tratamentos exerceram ação satisfatória sobre a correção do solo salino-sódico, uma vez que a percentagem de sódio trocável foi reduzida sensivelmente, comparando-se os dados do solo antes e depois da aplicação da matéria orgânica.

O tratamento com cultivo de atriplex também não proporcionou diminuição significativa da PST, mas destaca-se que na camada 0-10 cm este tratamento corresponde ao mais alto valor de PST entre os tratamentos, nas demais camadas (10-30 e 30-60 cm) isso se inverte e a PST do tratamento com atriplex passa a ser a mais baixa na última camada. É possível que a elevada variabilidade dos dados, por ter sido um experimento em campo sujeito a muitas variações do acaso, tenha dificultado a expressão dos efeitos dos tratamentos nas variáveis. Também, o tempo foi curto para expressar a atuação dos tratamentos nas propriedades dos solos, especialmente o da fitorremediação com *Atriplex nummularia*.

Os teores de COT foram mais elevados com o uso dos esterco bovino e ovino, mas apenas na camada de 0-10 cm, ressaltando-se a importância da aplicação de materiais orgânicos nos solos afetados por sais, naturalmente muito pobres em matéria orgânica. Devido à incorporação dos esterco no solo ser efetuada mais na camada superficial do solo, os resultados de COT foram mais elevados somente na profundidade de 0-10 cm, diminuindo os teores com

o aumento da profundidade. Desta forma, verifica-se a necessidade de aplicações mais profundas e mais periódicas nestes tipos de solo. Ao se comparar o período de coleta, observaram-se valores mais elevados de COT em Abril de 2011, época esta em que as precipitações foram mais elevadas (172 mm).

Optou-se por apresentar os resultados de  $\text{Na}^+$  trocável e PST (Figuras 10 e 11) por serem estas variáveis as melhores indicadoras da presença de sais de  $\text{Na}^+$  no solo. Não foram encontradas diferenças de  $\text{Na}^+$  trocável nem de PST entre os tratamentos, porém, verificaram-se alterações nestas variáveis em função do tempo nas três camadas avaliadas, provavelmente, em consequência das variações nas precipitações pluviais e das altas taxas de evapotranspiração nas quatro épocas de coleta do solo.

No tratamento com cultivo de atriplex observa-se uma redução nos teores de  $\text{Na}^+$  trocável e PST nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm até os 12 meses de experimento. É possível que o aumento nestas duas variáveis observado na última coleta de solo tenha ocorrido por acréscimos de sais de sódio advindos de áreas vizinhas, já que o experimento é em campo e não há o controle dessas entradas.

Souza et al.(2011), avaliando a extração de sais pela *Atriplex nummularia* cultivada em solo salino-sódico sob condições de estresse hídrico observaram valores significativamente menores ao final do experimento, indicando um efeito benéfico desta planta na extração de sais. No entanto, o experimento foi em condições controladas em vasos em casa de vegetação, desta forma, sem entradas externas de sais, como neste trabalho.

Praticamente em todos os tratamentos ocorreu um aumento dos teores de  $\text{Na}^+$  trocável e PST com a profundidade do solo. Como este solo apresenta valores elevados de  $\text{Na}^+$  no complexo de troca, é importante frisar o comportamento dispersivo dos coloides na presença deste cátion. Para Freire & Freire (2007), o  $\text{Na}^+$  é um cátion que promove a expansão da dupla camada difusa, e conseqüentemente, acarreta a dispersão dos coloides, seguida de sua movimentação ao longo do perfil do solo. Uma vez dispersos e em movimento, os coloides podem obstruir os poros, o que interfere sobre as propriedades físicas como a condutividade hidráulica, infiltração e aeração.

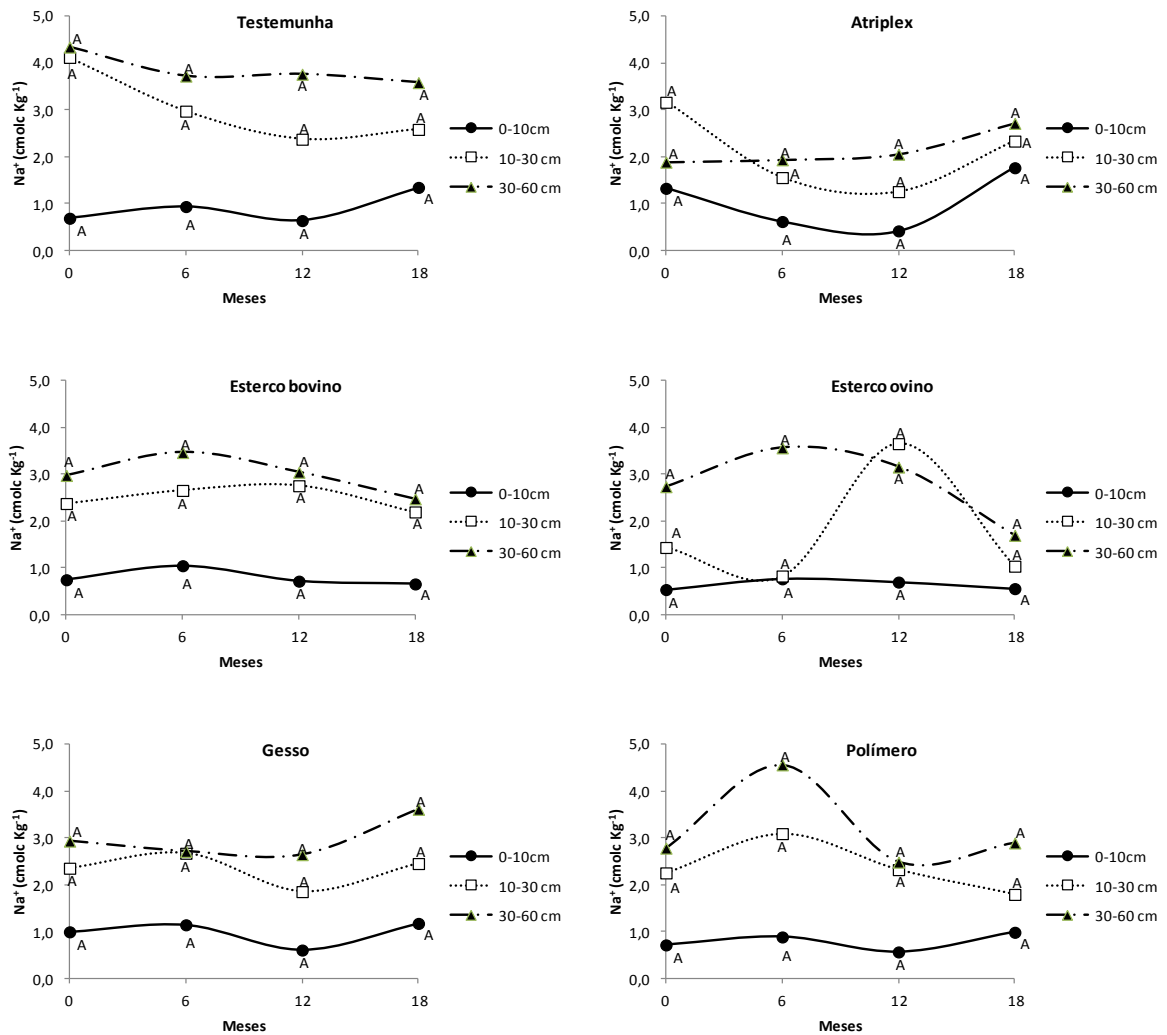


Figura 10 - Sódio trocável do solo nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm em função dos tratamentos e da época de coleta (0, 6, 12 e 18 meses). Médias seguidas de letras iguais na mesma profundidade não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, para cada tratamento e profundidade.

Verificaram-se, ainda, valores elevados de PST nas camadas de 10-30 e 30-60 cm, na maioria das vezes superiores ao limite de solos sódicos defendido por Pizarro (1985), de 7%, ou mesmo pelo limite estipulado pelo USSL Staff (1954), que é de 15%. Em trabalho com solos similares a este no Estado de Pernambuco, Freire et al. (2003a) identificaram valores bem inferiores aos encontrados nesta pesquisa, como limitantes ao uso agrícola.

Avaliando a PST em função da profundidade, verificou-se presença de solos com problema de sodicidade nas camadas mais profundas (Figura 11), tendendo a degradação dos mesmos, onde suas propriedades físicas, especialmente a condutividade hidráulica podem estar sendo afetadas pelo

aumento da dispersão, influenciando negativamente na infiltração da água no solo.

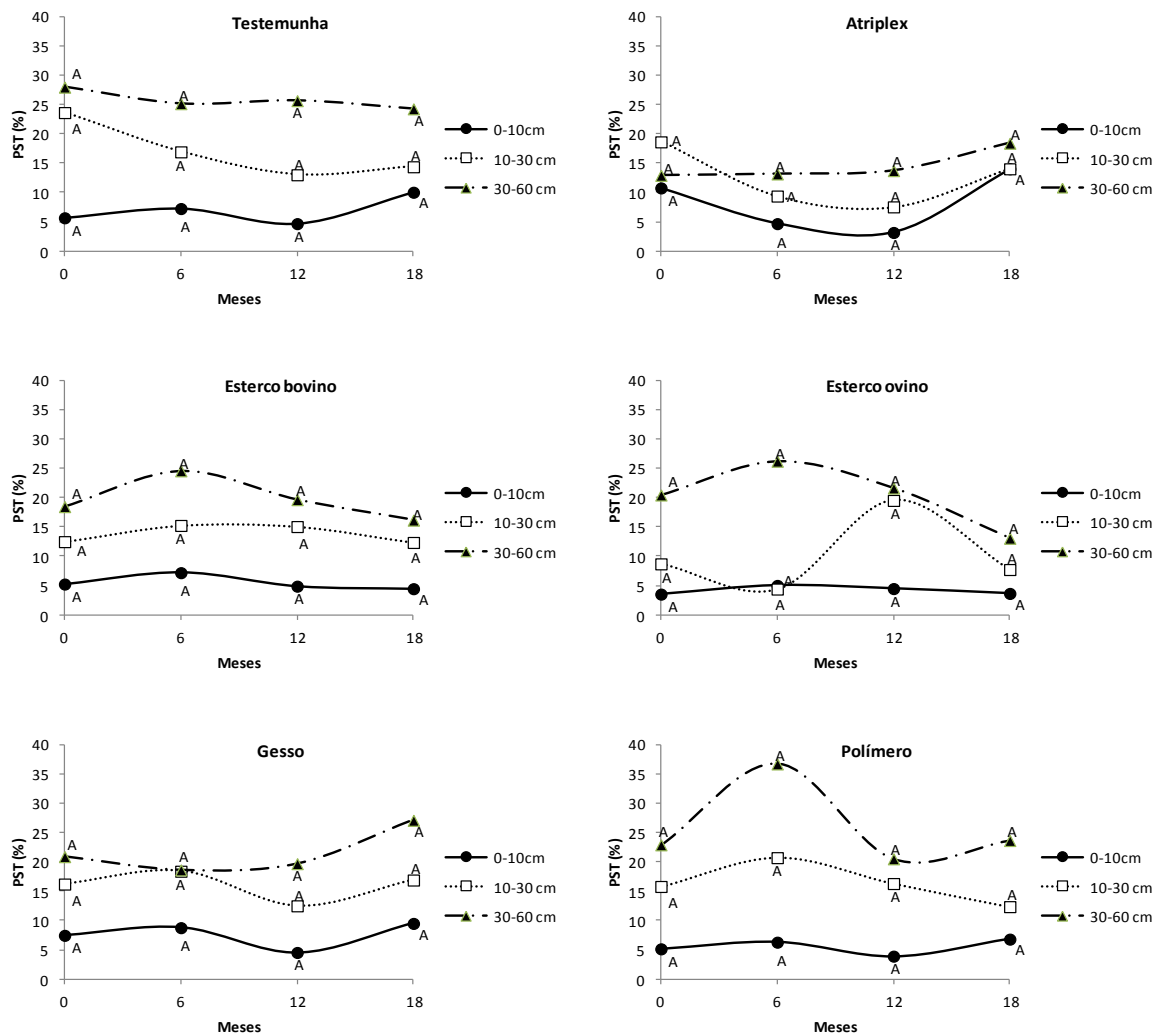


Figura 11 - Percentagem de sódio trocável do solo nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm em função dos tratamentos e da época de coleta (0, 6, 12 e 18 meses). Médias seguidas de letras iguais na mesma profundidade não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, para cada tratamento e profundidade.

No Perímetro Irrigado de São Gonçalo (PB) em um solo salino-sódico, Gomes et al.(2000) instalaram um experimento com o objetivo de avaliar o efeito de diferentes produtos condicionadores nas propriedades químicas do solo. Estes autores observaram que as reduções da PST foram mais significativas nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade do solo, com destaque para a camada de 0-20 cm onde ocorreram diminuições da PST de

48,5% para 14%, 46% para 29% e 25% para 17,7% nos tratamentos com esterco de curral, casca de arroz e gesso, respectivamente. Os condicionadores orgânicos (esterco de curral, casca de arroz e vinhaça) reduziram a PST, possivelmente devido à liberação de CO<sub>2</sub> e ácidos orgânicos durante a decomposição anaeróbica da matéria orgânica quando submetida às condições de lavagem, além de atuarem como fontes de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> mostrando, assim, a possibilidade do uso desses produtos na recuperação de solos salino-sódicos. Contudo, requerem maior tempo para uma atuação mais efetiva nas propriedades dos solos.

Diante disso, verifica-se a necessidade de trabalhos mais longos e também de novas aplicações de condicionantes orgânicos e químicos aliados a um sistema de drenagem e lâminas de lixiviação, pois, para correção de solos com problemas de excesso de sais de Na<sup>+</sup> sua correção ocorre mais lentamente. Segundo Costa et al. (2010) uma das variáveis mais importantes para a recuperação de solos afetados por sais, sobretudo para tomada de decisão do agricultor, refere-se aos números de anos necessários para que todo investimento realizado seja recuperado.

Araújo et al. (2011), objetivando analisar a viabilidade econômica do processo de recuperação de um solo sódico no Perímetro Irrigado Curu-Pentecoste (CE), utilizaram matéria orgânica, gesso e a interação entre os mesmos para a recuperação do solo. O processo de recuperação apresentou viabilidade econômica a uma taxa de juros de 12% ao ano, porém, considerando-se que o período de recuperação foi de nove anos, torna-se essencial a criação de uma linha de crédito subsidiada, destinada a agricultores familiares, como forma de incorporar ao processo produtivo as extensas áreas de solos degradados por Na<sup>+</sup>.

É possível que muitos dos resultados não tenham sido mais efetivos pelo curto tempo de experimentação para que a recuperação do solo realmente se efetivasse, especialmente na área em questão, com elevada demanda hídrica atmosférica e sem irrigação nem drenagem, de grande importância para o sucesso do empreendimento. Outros experimentos deveriam acompanhar as alterações nos solos por períodos mais longos.

#### 4.5. Atributos físicos do solo do experimento em campo

Como as propriedades químicas e as físicas do solo estão intimamente ligadas, a área do experimento em estudo teve valores de condutividade hidráulica em meio saturado muito baixos nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm, principalmente antes da aplicação dos tratamentos (Figura 12). Este comportamento pode estar relacionado à presença de sais de Na<sup>+</sup> na área, os quais favorecem a dispersão das argilas, além da própria compactação do solo favorecido pelo manejo inadequado.

Ao final do experimento, após 18 meses, verificou-se aumento na condutividade hidráulica do solo após a aplicação dos tratamentos nas duas profundidades estudadas, especialmente na camada de 0-10 cm (Figura 12). Os maiores incrementos ocorreram com os esterco bovino e ovino, seguidos do gesso e polímero, sendo estes aumentos altamente significativos quando comparados com o tempo de coleta e não foram significativos entre tratamentos nem entre profundidades (Tabela 8).

Este comportamento para os tratamentos e profundidades pode estar relacionado ao alto coeficiente de variação, de 140,65%, mas é uma característica da análise de K<sub>o</sub> em amostras de solo em campo. Em trabalho conduzido em casa de vegetação com este mesmo solo e tratamentos semelhantes, Miranda et al. (2011), ao final da passagem da lâmina de lixiviação após 70 dias de aplicação dos condicionadores químicos e orgânicos, verificaram um valor de condutividade hidráulica superior quando aplicado o esterco bovino, ovino, gesso e polímero, indicando a eficiência destes condicionadores no melhoramento da K<sub>o</sub> do solo.

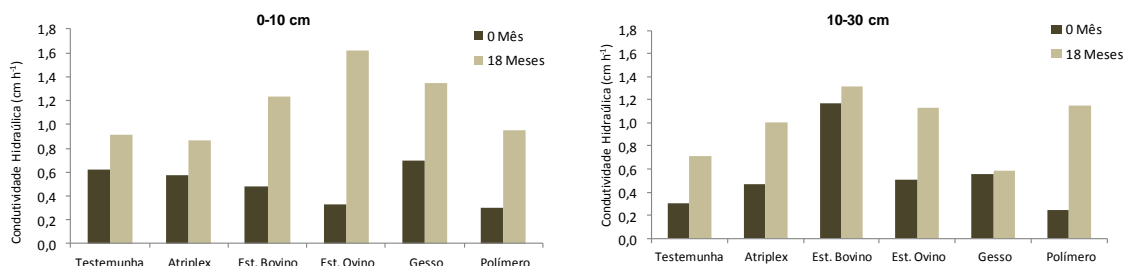


Figura 12 - Condutividade hidráulica em meio saturado do solo aos 0 e 18 meses nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm em função dos tratamentos aplicados.

Tabela 8 - Níveis de significância para a condutividade hidráulica em meio saturado, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade do solo, resistência à penetração, argila dispersa em água e índice de dispersão em função dos tratamentos, da profundidade do solo e do tempo de coleta

Efeitos	K <sub>0</sub> <sup>1</sup>	Mac <sup>2</sup>	Mic <sup>3</sup>	Ptotal <sup>4</sup>	Ds <sup>5</sup>	RP <sup>6</sup>	ADA <sup>7</sup>	ID <sup>8</sup>
Tratamento (Tr)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Profundidade (P)	ns	*	***	**	ns	ns	***	**
Tempo (Te)	***	***	***	*	ns	***	ns	ns
Tr x P	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
Tr x Te	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P x Te	ns	ns	***	**	*	ns	ns	ns
Tr x P x Te	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	140,65	30,13	6,17	8,68	4,80	79,04	21,30	29,16

<sup>1</sup>Condutividade hidráulica em meio saturado; <sup>2</sup>Macroporosidade; <sup>3</sup>Microporosidade; <sup>4</sup>Porosidade total; <sup>5</sup>Densidade do solo; <sup>6</sup>Resistência à penetração; <sup>7</sup>Argila dispersa em água; <sup>8</sup>Índice de dispersão. ns = não significativo; \*\*\*, \*\*, \* = significativo a 0,1%, 1% e 5%, respectivamente, pelo teste de Scott-Knott.

O uso do esterco ovino promoveu aumento de 0,33 para 1,62 cm h<sup>-1</sup> na K<sub>0</sub>, enquanto o esterco bovino, de 0,48 para 1,23 cm h<sup>-1</sup> na camada de 0-10 cm (Figura 12). Resultados semelhantes foram encontrados por Valadão et al. (2011), avaliando a adição de cama de frango crua e compostada nas alterações das propriedades físicas do solo, os quais verificaram que a adubação orgânica, no caso em particular a cama de frango compostada, foi a que mais influenciou positivamente nas características físicas do solo, equivalendo-se, em muitos parâmetros analisados, à área nativa em estudo. Estes autores obtiveram resultados da ordem de 0,82 cm h<sup>-1</sup> com a utilização do plantio direto com adubação mineral, porém quando utilizaram o plantio direto com a adição de cama de frango compostada os resultados da condutividade hidráulica ficaram na ordem de 3,12 cm h<sup>-1</sup>, comprovando a importância do uso de compostos orgânicos nos atributos físicos do solo.

Confirmando as respostas encontradas nestes trabalhos, Barzegar et al. (2002), ao analisarem a influência de tipos de materiais orgânicos nas propriedades físicas do solo, encontraram diferenças na contribuição à condutividade hidráulica entre os materiais.

Os resultados de condutividade hidráulica na profundidade de 0-10 cm obtidos com a aplicação do gesso indicaram a eficiência do mesmo sobre a melhoria da qualidade física do solo (Figura 12). Para Barros et al. (2004) os incrementos ocorreram tanto possivelmente pela substituição do Na<sup>+</sup> trocável



do complexo de troca pelo  $\text{Ca}^{2+}$  fornecido pelo corretivo, como pela floculação das argilas, proporcionando maior condutividade hidráulica. Os resultados presentes neste trabalho são semelhantes aos encontrados por Barros et al. (2006) que também constataram a eficácia do gesso na melhoria da permeabilidade do solo à água em solos salino-sódicos.

A aplicação do polímero no solo foi eficaz na melhoria da condutividade hidráulica nas duas profundidades avaliadas, ao final dos 18 meses de experimento (Figura 12). Os resultados de  $K_0$  passaram de valores abaixo de  $0,30 \text{ cm h}^{-1}$  para valores acima de  $1,15 \text{ cm h}^{-1}$  no fim do experimento. Alguns trabalhos utilizando polímeros foram testados para melhorar várias propriedades físicas de solos sodificados (Wallace & Wallace, 1986; Wallace et al., 1986).

As pesquisas relatadas por Wallace et al. (1986) constataram que o uso de poliacrilamidas aniônicas aumentou a taxa de infiltração de água em um solo sódico em quatro vezes. Já os estudos realizados por Cay et al. (2001) mostraram que uma aplicação de PAM na dose de  $5 \text{ kg ha}^{-1}$ , combinado com gesso na dose de  $0,6 \text{ t ha}^{-1}$ , foi eficaz na redução da dispersão de um solo sódico e reduziu a turbidez da água por mais de 99,7% em condições de laboratório. Portanto, verifica-se que os polímeros atuam na melhoria das propriedades físicas dos solos. No entanto, para que a mobilização do  $\text{Na}^+$  do complexo de troca seja mais eficiente com a utilização dos polímeros, é necessário o uso de corretivos que contenham  $\text{Ca}^{2+}$  na sua composição associado aos polímeros.

O tratamento com atriplex promoveu acréscimo nos valores de condutividade hidráulica com o tempo, porém estes valores foram menores do que nos tratamentos com esterco, gesso e polímero na camada de 0-10 cm (Figura 12). Por outro lado, observou-se aumento da condutividade hidráulica com o aumento da profundidade, provavelmente relacionado com uma maior concentração de raízes nesta área no tratamento cultivado com atriplex, indicando o efeito da planta em subsuperfície pela melhor estruturação do solo.

A aplicação dos tratamentos ocasionou mudanças na macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo entre 0 e 18 meses de experimentação nas duas profundidades estudadas (Figura 13), havendo diferença significativa para as profundidades e para o tempo de coleta para a macro, micro e porosidade total (Tabela 8).

Apesar de baixos, os efeitos mais evidentes foram sobre a macro e a microporosidade do solo. Na camada de 0-10 cm, a macroporosidade aumentou em 42,6% em relação ao início do experimento no tratamento com gesso e 19,16% no tratamento com polímero. Já na profundidade de 10-30 cm ocorreram aumentos de 27,80%, 28,06% e 17,39% para os tratamentos com gesso, polímero e atriplex, respectivamente.

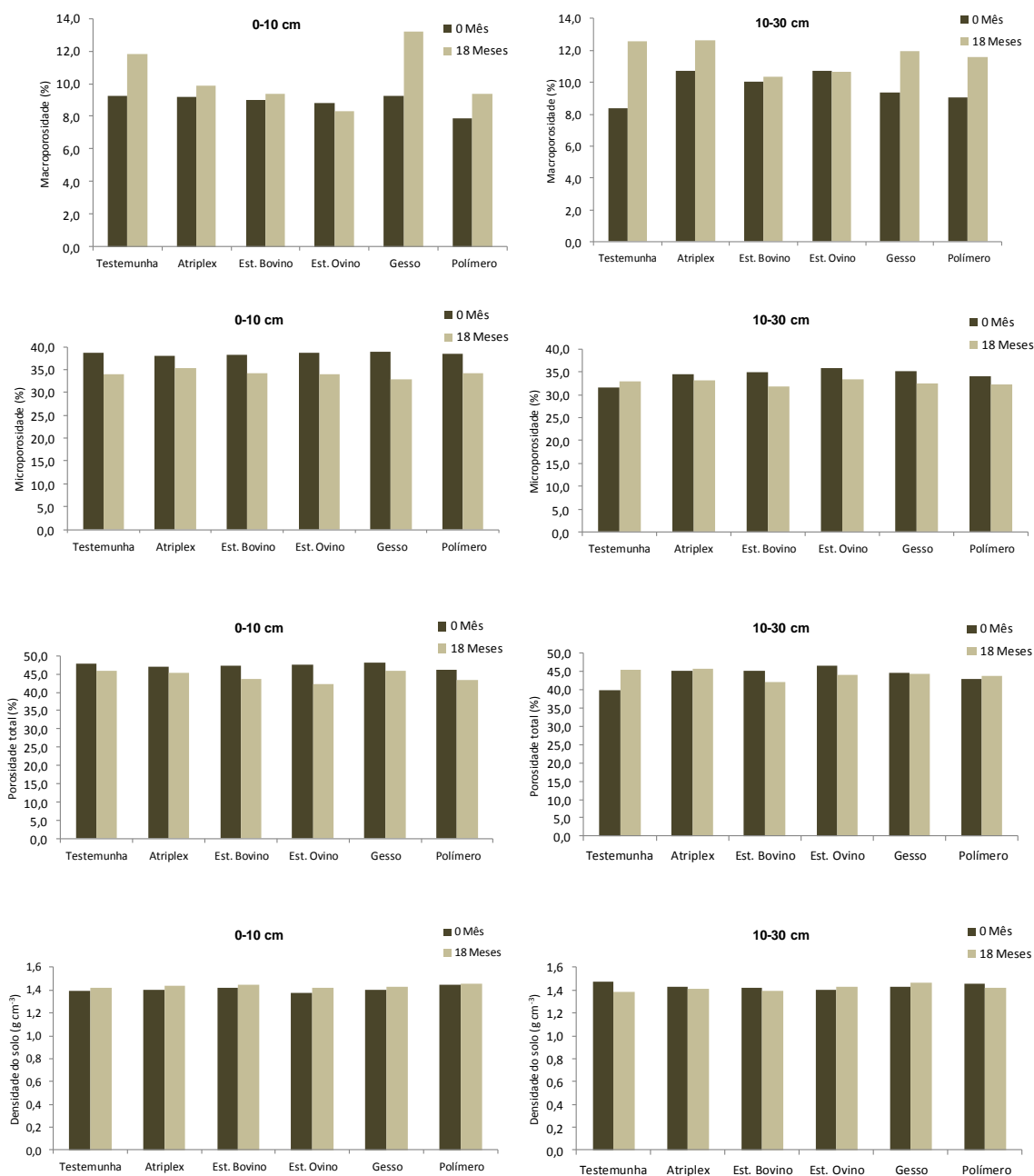


Figura 13 - Macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo aos 0 e 18 meses nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm em função dos tratamentos aplicados.

Na camada de 0-10 cm verificou-se que, ao início do experimento e na maioria dos tratamentos, os valores de macroporosidade estavam abaixo de 10%, valores estes considerados inadequados para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, segundo Baver et al. (1972). Estes autores mencionam que o valor mínimo de macroporosidade para não prejudicar o sistema radicular e a aeração do solo é de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Da mesma forma, Xu et al. (1992) explicam que abaixo deste valor, a aeração do solo pode ser reduzida de maneira drástica, a ponto de prejudicar a respiração de raízes e, portanto, o crescimento radicular.

Após os 18 meses de experimento, observou-se uma redução na microporosidade e na porosidade total do solo em quase todos os tratamentos aplicados e nas duas profundidades avaliadas. De acordo com Alves (2001), a microporosidade e a porosidade total se alteram à medida que a macroporosidade se modifica. Almeida et al. (2008) encontraram resultados semelhantes de microporosidade e porosidade total, verificando diferença significativa entre as camadas do solo com o uso de rotação de culturas.

Os valores de densidade do solo praticamente não foram alterados, provavelmente, pela necessidade de períodos mais longos de avaliação para ocorrerem resultados significativos, ou por meio de adições mais frequentes dos tratamentos para que houvesse redução na densidade do solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Camilotti et al. (2006), utilizando resíduos orgânicos como lodo de esgoto e vinhaça aplicados anualmente em um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar, os quais não obtiveram redução da densidade do solo. Da mesma forma, Jorge et al. (1991) verificaram que aplicações de até  $80 \text{ t ha}^{-1}$  de lodo de esgoto também não alteraram tais atributos de um Latossolo Vermelho.

Por outro lado, a resistência à penetração do solo foi reduzida com a aplicação dos tratamentos nas duas profundidades estudadas (Figura 14), havendo diferença significativa entre os tempos (Tabela 8). Quanto aos tratamentos aplicados, os que mais se destacaram na redução da resistência à penetração em relação aos valores iniciais foram o polímero, com uma redução de 40 e 62% nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm, respectivamente; o esterco bovino e a atriplex na profundidade de 10-30 cm, com uma redução de 53% cada.

O efeito do polímero na redução da resistência a penetração pode estar relacionado com a ação aglutinadora, aumentando os tamanhos dos agregados, os quais aumentam a macroporosidade do solo e sua condutividade hidráulica. Para Levy & Agassi (1995), a adição de pequenas quantidades de polímeros, principalmente de poliacrilamida aniônica, melhora a estabilidade dos agregados da superfície, mantém a alta permeabilidade das crostas dos solos expostos à chuva ou irrigação e reduz a resistência mecânica da camada superficial do solo.

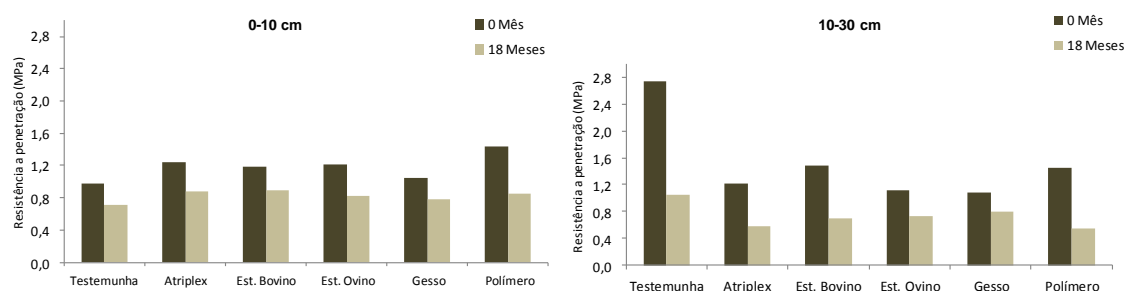


Figura 14 - Resistência a penetração do solo aos 0 e 18 meses nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm em função dos tratamentos aplicados.

De maneira geral, os maiores valores de resistência foram encontrados no início do experimento (0 mês) em todos os tratamentos, principalmente para a testemunha na profundidade de 10-30 cm, que apresentou valor de 2,74 MPa (Figura 14). Este fato pode estar relacionado aos valores elevados de densidade do solo e baixa quantidade de macroporos encontrados no solo. Para Klein & Libardi (2000), a resistência à penetração é uma propriedade que varia com a densidade do solo, sendo alterada pelo teor de matéria orgânica e manejo do solo.

Contudo, foram verificados valores relativamente baixos para a resistência à penetração, variando entre 1,48 e 0,55 MPa nas duas profundidades aos 0 e 18 meses, com exceção da testemunha na profundidade de 10-30 cm, quando comparados ao valor de 2,0 MPa, o qual é considerado crítico para o desenvolvimento ótimo da maioria das culturas (Tormena, 1998).

Outros valores tidos como críticos podem ser encontrados na literatura, como os comentados em Arshad et al. (1996), que afirmam que a resistência pode ser restritiva ao crescimento das raízes quando seus valores variarem de 2 a 4 MPa. Já para Materechera et al. (1991), os níveis críticos de resistência à penetração para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo e a

espécie cultivada. Diferentemente dos resultados encontrados neste trabalho, Valadão et al. (2011), trabalhando com diferentes sistemas de manejo, encontraram resultados mais elevados de resistência à penetração, ficando em média acima de 3,0 MPa.

Embora os valores da resistência à penetração (RP) neste estudo não tenham atingido os níveis críticos comentados anteriormente, a redução dos valores de RP, alcançada com tratamentos aplicados, comprova a eficiência dos tratamentos na remediação da compactação dos solos estudados.

Os teores de argila dispersa em água não diferiram entre os tratamentos aplicados nem entre os tempos de coleta, porém, quando se comparam as profundidades do solo há um efeito altamente significativo (Tabela 8). A camada de 10-30 cm apresentou os maiores valores de argila dispersa em água, independentemente dos tratamentos aplicados, o que, possivelmente, pode estar relacionado à maior saturação por  $\text{Na}^+$  em subsuperfície neste solo (Figura 15). Este cátion é responsável pela dispersão dos coloides do solo, favorecendo o agravamento das condições físicas do solo. Sposito (1989) afirma que o íon  $\text{Na}^+$  promove aumento da espessura da dupla camada difusa na solução do solo, diminuindo a atração entre as partículas, o que resulta numa maior dispersão.

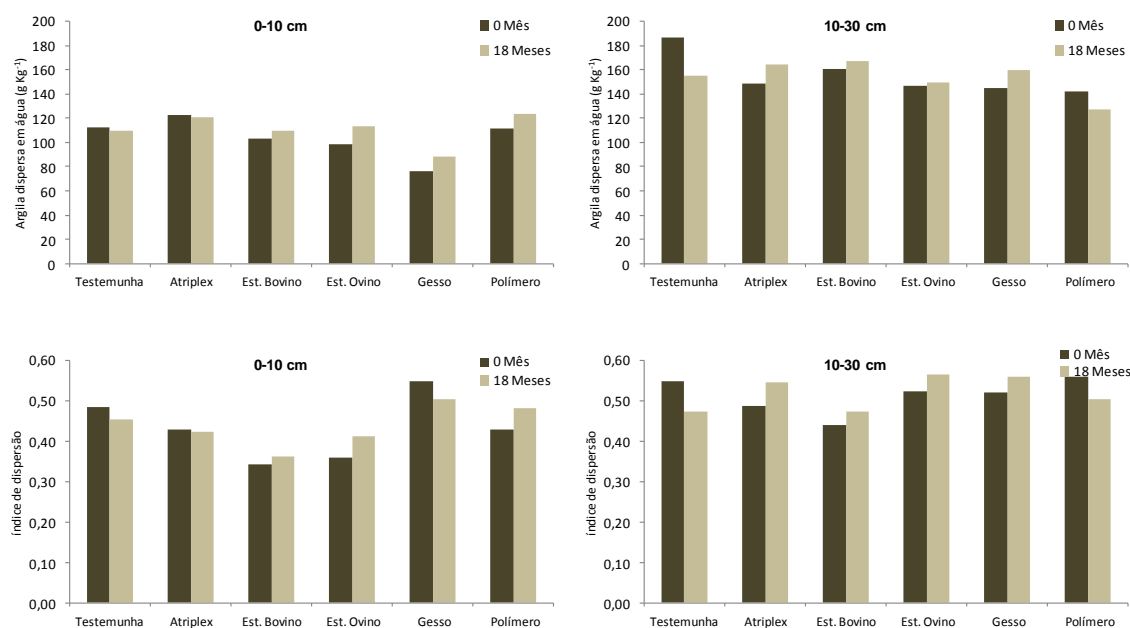


Figura 15 – Teores de argila dispersa em água e índice de dispersão aos 0 e 18 meses nas profundidades de 0-10 e 10-30 cm em função dos tratamentos aplicados.

O predomínio das forças repulsivas sobre as forças atrativas entre partículas coloidais promove a dispersão e, neste caso, ocorre o afastamento das partículas, individualizando-as e resultando na desestruturação do solo, redução da aeração e da infiltração de água. A força dominante depende da espessura da dupla camada difusa que responde, fundamentalmente, à natureza dos cátions envolvidos, à sua concentração e aos argilominerais dominantes no solo (Freire et al, 2003a e 2003b). Por influenciar nos atributos físicos do solo e na disponibilidade de nutrientes, tais condições, especialmente a dispersão das argilas em solos sódicos, podem restringir o crescimento vegetal (Santos et al., 2010).

Assim, pode-se associar as elevadas concentrações de argila dispersa em água nas profundidades de 0-10 cm e 10-30 cm aos altos valores de percentagem de  $\text{Na}^+$  no complexo de troca do solo. Silva et al. (2006), avaliando os efeitos dos sistemas de manejo com cana-de-açúcar em área irrigada, área não irrigada, área com aplicação de vinhaça e uma sob floresta nativa como condição original, verificaram que os solos sob os sistemas de sequeiro e irrigado apresentaram os maiores valores de concentração crítica de floculação nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm, indicando que as partículas do solo nesses dois sistemas de manejo são mais dispersíveis, podendo estar refletindo em uma maior saturação por  $\text{Na}^+$ .

Quanto ao índice de dispersão, de forma semelhante à argila dispersa em água, nota-se que não houve diferença significativa nas duas profundidades estudadas para os tratamentos e para o tempo de coleta, no entanto, foram detectadas diferenças entre as profundidades (Tabela 8). Os índices de dispersão, em sua maioria, foram mais elevados nas camadas de 10-30 cm, estando em alguns casos acima de 50% (Figura 15). Homem et al. (2012), avaliando a ocorrência de dispersão de argila em Latossolo Vermelho-Amarelo pela aplicação indiscriminada das águas residuárias, verificaram que os índices de dispersão com o uso destas águas ficaram em torno de 61%, mostrando-se um valor bem elevado, ou seja, mais da metade das argilas de solos apresentaram-se dispersas.

Desta maneira, percebe-se que os tratamentos não foram eficientes na redução da argila dispersa em água nem do índice de dispersão, pois não foram observadas diferenças significativas entre o início e os 18 meses da aplicação dos tratamentos (Tabela 8), sendo necessários períodos mais longos

de estudo para que fossem detectadas melhoras nas propriedades físicas deste solo. Outro fator que deve ter contribuído é o pequeno volume de água via precipitação na área do experimento, sendo esta essencial para a reação dos condicionantes e o melhor estabelecimento das plantas, bem como para o seu desempenho na recuperação do solo.

## 5. CONCLUSÕES

- Os lotes do Perímetro Irrigado de Custódia - PE apresentam solos em estágio de degradação pela salinidade e sodicidade. Entre os cátions solúveis avaliados, o  $\text{Na}^+$  foi o que esteve nas concentrações mais elevadas, principalmente nas camadas mais profundas do solo. Da mesma forma, os teores de  $\text{Cl}^-$  e da RAS elevaram-se com o aumento da profundidade;
- Nos solos do Perímetro avaliado, a PST aumentou em profundidade em todas as quatro coletas realizadas, indicando que os problemas neste Perímetro estão relacionados aos teores de  $\text{Na}^+$  trocável e à PST dos solos;
- Além dos problemas relacionados ao excesso de sais de  $\text{Na}^+$  no solo, boa parte das águas utilizadas no Perímetro encontra-se com valores de  $\text{Na}^+$  com risco moderado de toxicidade para as plantas;
- Mesmo com o pouco tempo para um experimento de fitorremediação e aplicação de corretivos químicos e orgânicos em campo, foram verificadas alterações na solução do solo em função dos tratamentos aplicados;
- Houve redução nos valores de CEes,  $\text{Na}^+$  solúvel e  $\text{Cl}^-$  com o cultivo de *Atriplex nummularia*, seguido da aplicação do polímero e do esterco ovino, principalmente na camada superficial;
- A prática de uso de condicionadores químicos e orgânicos e do uso de planta fitorremediadora promoveu modificações nas propriedades físicas do solo, com o aumento da condutividade hidráulica em meio saturado, aumento da macroporosidade e redução da resistência à penetração.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRO, S. A. & MAHAR, A. R. Reclamation of saline-sodic soils under rice-wheat crop rotation. *Pakistan Journal of Botany*, v. 39, n. 7, 2595-2600, 2007.

AGANGA, A. A.; MTHETHO, J. K.; & TSHWENYANE, A. *Atriplex nummularia* (Old Man Saltbush): A potential forage crop for arid regions of Botswana. *Pakistan Journal of Nutrition.*, v. 2, p. 72–75, 2003.

AGRA, M. G. & CAVALCANTE, L. F. Efeito da drenagem e do gesso agrícola num solo irrigado afetado por sais. *Ciência Agrícola*, v.1, n.2, p.151-158,1992.

AGUIAR NETTO, A. de O.; MACHADO, R. & VASCONCELOS, B. Diagnóstico do processo de salino-sodificação no Perímetro Irrigado Jabiberi-SE. *Irriga, Botucatu*, v. 11, n. 4, p. 448-459, 2006.

ALMEIDA, V. P.; ALVES, M. C.; SILVA, E. C.; OLIVEIRA, S. A. Rotação de culturas e propriedades físicas e químicas em Latossolo vermelho de cerrado sob preparo convencional e semeadura direta em adoção. *Revista brasileira de ciência do solo*, v. 32, p. 1227-1237. 2008.

ALMEIDA, B. G. Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008. Tese (Doutorado). 103 p.

ALMEIDA, O. A. de. Qualidade da água de irrigação [recurso eletrônico]. Embrapa Mandioca e Fruticultura. Cruz das Almas, 2010.

ALVES, M. C. Recuperação do subsolo de um Latossolo Vermelho usado para terrapleno e fundação da usina hidrelétrica de Ilha Solteira – SP. Ilha Solteira: UNESP/FEIS. 83p. Tese de Livre Docente, 2001.

ANDRADE, A.R.S.; GUERRINI, I. A. G.; GARCIA, C. J. B.; KATEZ, L. & GUERRA, H. O. C. Variabilidade espacial da densidade do solo sob manejo da irrigação. *Ciência Agrotécnica, Lavras*, v. 29, n. 2, p. 322-329, 2005.

ARAÚJO, A.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.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; & GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, J. W.; Jones, A. J. (ed). Methods for assessing soil quality. Madison: SSSA/ Special publication, n. 49, p. 123-141. 1996.

AYERS, R.S. & WESTCOT, D.W. A Qualidade da Água na Agricultura. 2a ed. Trad. GHEYI, H. R; MEDEIROS, J. F; DAMASCENO, F.A.V. Campina Grande. UFPB, 1999. 218p. Estudos FAO: Irrigação e drenagem, 29.

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.

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.

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.; SANTOS, P. M.; MELO, R. M.; & FERRAZ, F. B.; Avaliação de níveis para correção de sodicidade de solos. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v.1, p. 17-21, 2006.

BARVENIK, F. W. Polyacrylamide characteristics related to soil applications. Soil Science. v.158, n. 4, p. 235-243, 1994.

BARZEGAR, A.R.; YOUSEFI, A. & DARYASHENAS, A. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat. Plant Soil, v.247, p.295-301, 2002.

BASSOI, L. H.; TEIXEIRA, A. H. de C.; BRAGA, M. B.; SIMÕES, W. L.; CALGARO, M.; & PINTO, J. M. Uso da água em agricultura irrigada no semiárido brasileiro. In: SÁ, I. B. & SILVA, P. C. G. da. (eds). Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação. Petrolina: Embrapa semiárido. 402 p., 2010.

BATISTA, M. J.; NOVAIS, F. de. & SANTOS, D. G. Drenagem como instrumento de dessalinização e prevenção da salinização dos solos. Brasília, SRH, 203p. 1998.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H. & GARDNER, W. R. Soil physics. J. Wiley C. Sons, in. press, 529p, 1972.

BEN SALEM, H.; NEFZAOU, A. & BEN SALEM, L. Spineless cactus (*Opuntia ficus indica* f. *inermis*) 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, 2003.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A. & MANTOVANI, E. C. Manual de irrigação. 8 ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625 p.

BULLUCK III, L.R.; BROSIUS, M.; EVANYLO, J. K. & RISTAINO, J. B. Organic and synthetic fertility amendments influence soil microbial, physical and chemical properties on organic and conventional farms. Applied Soil Ecology, Raleigh, v.19, n.2, p.147-160, 2002.

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; MARQUES, M. O.; SILVA, A.R.; TASSO JÚNIOR, L. C.; & NOBILE, F. O. Atributos físicos de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar após aplicações de lodo de esgoto e vinhaça. Engenharia Agrícola, v.26, n.3, p.738-747, 2006.

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.

CAY, E.; SIVAPALAN, S. & CHAN, K. Y. Effect of polyacrylamides on reducing the dispersive properties of sodic soils when flood irrigated. Proceedings of the

Irrigation Association of Australia Conference, Toowoomba, Queensland, Australia, 11-12 July 2001, pp. 28-32, 2001.

CHAVES, L. H. G.; TITO, G. A.; CHAVES, I. B.; LUNA, J. G. & SILVA, P. C. M. Propriedades químicas do solo aluvial da ilha de Assunção – Cabrobó (Pernambuco). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.431-437, 2004.

CHAVES, L. C. G.; SANTOS, J. C. N. dos; MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M. & ARAÚJO NETO, J. R. Dinâmica da salinidade do solo em áreas do Distrito de Irrigação Araras Norte, Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, v.40, p. 522-532, 2009.

CHRISTOFIDIS, D. Olhares sobre a política de recursos hídricos no Brasil: o caso da bacia do São Francisco. Brasília: UnB. 432P. 2001. Tese Doutorado.

CORDEIRO, G. G. Qualidade de água para fins de irrigação: conceitos básicos e práticos. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2001. 31 p. (Embrapa Semiárido. Documentos, 167).

CORRÊA, R. M.; FREIRE, M. B. G. S.; FERREIRA, R. L. C.; FREIRE, F. J.; PESSOA, L. G. M.; MIRANDA, M. A.; & MELO, D. V. M. Atributos químicos de solos sob diferentes usos em perímetro irrigado no Semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 305-314, 2009.

CORRÊA, R. M.; FREIRE, M. B. G. S.; FERREIRA, R. L. C.; SILVA, J. A. A.; PESSOA, L. G. M.; MIRANDA, M. A. & MELO, D. V. M. Atributos físicos de solos sob diferentes usos com irrigação no Semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 4, p. 358-365, 2010.

COSTA, R. N. T.; LACERDA, C. F. de.; SILVA, L. A. C. & ARAÚJO, A. P. B. de. Indicadores de rentabilidade da recuperação de solos sódicos. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. da S. & LACERDA, C. F. de. (Ed). *Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados*. Fortaleza, INCTSal, 2010. 472p.

D'ALMEIDA, D. M. B. A.; ANDRADE, E. M. & MEIRELES, A. C. M. Importância relativa dos íons na salinidade de um Cambissolo na Chapada do Apodi, Ceará. *Engenharia Agrícola*, v.25, n.3, p.615-621, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS – DNOCS.  
Disponível em <http://www.dnoocs.gov.br> Acesso em 29 de outubro de 2008.

DE PAOLI, M. A. Degradação e estabilização de polímeros. 2ª. versão online (Revisada), 2008.

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

FAGERIA, N. K. & GHEYI, H. R. Efeitos dos sais sobre as plantas. In: GHEYI, H. R.; QUEIROZ, J. E.; MEDEIROS, J. F. de. (Ed.). Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada. Campina Grande: UFPB/SBEA, P.125-131, 1997.

FAO. Global Network on integrated soil Management for Sustainable Use of Salt-affected Soil. Rome: 2000. <http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush>.

FARIFTEH, J.; VAN DER MEER, F.; ATZBERGER, C. & CARRANZA, E.J.M. Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra: A comparison of two adaptive methods (PLSR and ANN). Remote Sensing of Environment, v.110, p.59-78, 2007.

FERNANDES, J. G.; FREIRE, M. B. G. S.; CUNHA, J. C.; GALVÍNCIO, J. D.; CORREIA, M. M.; & SANTOS, P. R. 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.

FRANCLLET, A. & LE HOUÉROU, H.N. Les Atriplex en Tunisie et en Afrique du Nord. Roma: FAO, 1971. 249 p. FAO Report Technique, 7.

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, 2003a.

FREIRE, M. B. G. dos S.; RUIZ, H. A.; RIBEIRO, M. R.; FERREIRA, P. A.; ALVAREZ, V. H. & FREIRE, F, J. Estimativa do risco de sodificação de solos

de Pernambuco pelo uso de águas salinas de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, n. 2, p. 227- 232, 2003b.

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. 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.

GHEYI, H. R. Problemas de salinidade na agricultura irrigada. In: Oliveira, T. S. de; Assis Jr, R. N.; Romero, R. E.; Silva, J. R. C. (org). Agricultura, sustentabilidade e o semiárido. Viçosa: Folha de Viçosa/ SBCS. V. 1 p. 329-346, 2000.

GOMES, M. E.; GHEYI, H. R. & SILVA, F. de F. E. Melhorias nas propriedades químicas de um solo salino-sódico e rendimento de arroz sob diferentes tratamentos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.3, p. 355-361, 2000.

HELALIA, A. M. & LETEY, J. Polymer type and water quality effects on soil dispersion. *Soil Science Society of America Journal*, v.52, n.1, p. 243-246, 1988.

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.

HOMEM, B. G. C.; ALMEIDA NETO, O. B.; SANTIAGO, A. M. F. & SOUZA, G. H. Dispersão da argila provocada pela fertirrigação com águas residuárias de criatório de animais. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*. v.2, n.1, p. 89-98, 2012.

IPA – INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO. *Atriplex nummularia*. Disponível em: <[http:// www.ipa.br/resp11.htm](http://www.ipa.br/resp11.htm)>. Acesso em 28 Dezembro de 2004.

IPA - INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO. Índices Pluviométricos. Disponível em: [http://www.ipa.br/indice\\_pluv.php#calendario\\_indices](http://www.ipa.br/indice_pluv.php#calendario_indices). Acesso em 10 de Janeiro de 2012.

JORDAN, F.; WAUGH, J.; GLENN, E.; SAM, L.; TOMPSON, T. & TOMPSON, T. L. Natural bioremediation of a nitrate contaminated soil-and-aquifer system in a desert environment. *Journal of Arid Environment.*, v.72, p.748–753. 2008.

JORGE, J. A.; CAMARGO, O. A. & VALADARES, J. M. A. S. Condições físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro quatro anos após aplicação de lodo de esgoto e calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.15, n.3, p.237-40, 1991.

KHAN, M. A. & ABDULLAH, Z. Salinity/sodicity induced changes in reproductive physiology of rice (*Oryza sativa* L.) under dense soil conditions. *Environmental and Experimental Botany, Paris*, v.49, n.2, p.145-157, 2003.

KLEIN, N. A. & LIBARDI, P. L. Faixa de umidade menos limitante ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.10, p.959-960, 2000.

KLEIN, V. A. Física do solo. Passo Fundo. Ed. Passo Fundo, p.212, 2008.

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.

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.

LEVY, G. J., LEVIN, J., GAL, M. & BEN-HUR, M. Polymers' effects on infiltration and soil erosion during consecutive simulated sprinkler irrigations. *Soil Science Society Of America Journal*. v.56, p.902-907, 1992.

LEVY, G. J. & AGASSI, M. Polymer molecular weight and degree of drying effects on infiltration and erosion of three different soils. Australian. Journal. Soil Research. v.33, p.1007-1018, 1995.

LOPES, J. F. B.; ANDRADE, E. M. & CHAVES, L. C. G. Impacto da irrigação sobre os solos de Perímetros Irrigados na Bacia do Acaraú, Ceará, Brasil. Revista Engenharia Agrícola, v. 28, n.01, p. 34-43, 2008.

MACÊDO, L. de S. Salinidade em áreas irrigadas. João Pessoa: EMEPA – PB, 1988. 11 p. (EMEPA. Comunicado Técnico, 38).

MACÊDO, L. S. & MENINO, I. B. Monitoramento de sais na água e nos solos irrigados do Projeto Vereda Grande – PB. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 2, p. 47- 51, 1998.

MADEIRA, M. M.; MARTINS, O. C.; SERRALHEIRO, R. P. & SANTOS, F. L. Conservação do solo e da água em regádio. IN: CONGRESSO IBERICO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DE ÁGUA, 2. 2000.

MATERECHERA, S. A.; DEXTER, A. R. & ALSTON, A. M. Penetration of very strong soil by seedling of different plant species. Plant and soil, v.135, p.31-41, 1991.

MEDEIROS, J. F. Qualidade da água de irrigação e evolução da salinidade nas propriedades assistidas pelo “GAT” nos estados do RN, PB e CE. UFPB, 1992. 163p. Dissertação Mestrado.

MEDEIROS, J. F. Salinização em áreas irrigadas: manejo e controle. In: FOLEGATI, M. V. et al. Fertirrigação: flores, frutas e hortaliças. Guaíba: Agropecuária, v.2, cap. 2, p. 201-240, 2001.

MEDEIROS, J. F. de; GHEYI, H. R.; DIAS, N. da S. & CARMO, G. A. do. Riscos e medidas mitigadoras para a salinidade em áreas irrigadas. Reunião Sulamericana para manejo e sustentabilidade da irrigação em regiões áridas e semiáridas. Salvador-BA, 2008.

MEDEIROS, J. F. de.; NASCIMENTO, I. B. do. & GHEYI, H. R. Manejo do solo-água-planta em áreas afetadas por sais. In: GHEYI, H. R; DIAS, N. da S. &



LACERDA, C. F. de. eds. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. INCTSal, Fortaleza – CE, 472p., 2010.

MEIRELES, A. C. M. Dinâmica qualitativa das águas superficiais da bacia do Acaraú e uma proposta de classificação para fins de irrigação. Fortaleza: UFC, 2007. 180p. Tese Doutorado

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.

MELLO, F. A. F.; BRASIL SOBRINHO, M. O. C.; ARZOLLA, S.; SILVEIRA, R. I.; COBRA NETO, A. & KIEHL, J. C. Fertilidade do solo. São Paulo, Nobel, 400p. 1983.

MENDES, J. S.; CHAVES, L. H. G. & CHAVES, I. E. Variabilidade temporal da fertilidade, salinidade e sodicidade de solos irrigados no município de Congo – PB. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v. 3, n.1, p.13-19, 2008.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. & CORRENTE, J. E. Caracterização estatística de variáveis físicas do solo. Revista Acta Scientiarum: Agronomy, v.25, n.1, p.35-44, 2003.

MEUNIER, I. M. J.; SILVA, J. A. A. & FERREIRA, R. L. C. Inventário florestal: programas de estudo. Recife: Imprensa Universitária da UFRPE, 189 p., 2001.

MIRANDA, M. A.; OLIVEIRA, E. E. M., SANTOS, K. C. F.; FREIRE, M. B. G. S. & ALMEIDA, B. G. 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.

MUNS, R. & TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology, v. 59, p. 651–681, 2008.

NEVES, C. S. das. Efeitos da matéria orgânica, do gesso e lavagem na melhoria química de um solo salino-sódico. Recife: UFRPE, 1997. 56p. Dissertação Mestrado.

OLDEMAN, L. R.; HAKKELING, R. T. A. & SOMBROEK, W. G. World map of the status of human-induced soil degradation: An explanatory note (GLASOD project). ISRIC, Wageningen, the Netherlands and UNEP, Nairobi, Kenya. 1991.

OLIVEIRA, L. B. de; RIBEIRO, M. R.; FERREIRA, M. da G. de V. X.; LIMA, J. F. W. F. de & MARQUES, F. A. Interferências pedológicas aplicadas ao perímetro irrigado de Custódia, PE. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.37, n.10, p.1477-1486, 2002.

PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; LOPES, F. B.; ALEXANDRE, D. M. B. & ARRAES, F. D. D. Similaridade da qualidade das águas superficiais da bacia do Curu, Ceará. Ciência Rural, v.39, n.9, p. 2494-2500, 2009.

PEREIRA, F. H. F.; ESPINULA NETO, D.; SOARES, D. C. & OLIVA, M. A. Trocas gasosas em plantas de tomateiro submetidos a condições salinas. Horticultura Brasileira, v.22, n.2, 2005.

PIZARRO, F. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Madrid: ediciones mundi-prensa, 1985. 542p.

PORTO, E. R.; AMORIM, M. C. C. & SILVA JÚNIOR, L. G. A. Uso de rejeito de dessalinização de água salobra para irrigação da erva-sal (*Atriplex nummularia*), Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, p.111-114, 2001.

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.

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.

RAIJ, B. V. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba; Instituto da potassa & Fosfato, 1981. 142p.

RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Editora Ceres, 1991. 343p.

RIBEIRO, M. R.; FREIRE, F. J. & MONTENEGRO, A. A. A. Solos halomórficos no Brasil: Ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável. In: CURTI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G. G.; et al. eds. Tópicos em Ciência do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003, 3, p. 165-208.

RIBEIRO, M. R.; BARROS, M. de F. C. & FREIRE, M. B. G. dos S. Química dos solos salinos e sódicos. IN: MELO, V. de F. & ALLEONI, L. R. F. (eds.). Química e Mineralogia do solo, parte II, 685p. SBCS, Viçosa-MG, 2009.

ROSA JÚNIOR, E. J.; MARTINS, R. M. G.; ROSA, Y. B. C. J. & CREMON, C. Calcário e gesso como condicionantes físico e químico de um solo de cerrado sob três sistemas de manejo. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 36, n.1 p. 37-44, 2006.

RUIZ, H. A.; SAMPAIO, R. A; OLIVEIRA, M. de. & ALVAREZ V., 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.

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.

RUSSELL, E. W. Russell's soil conditions and plant growth. 11<sup>th</sup> ed. New York: Longman scientific & technical, 991 p., 1988.

SALCEDO, I.H.; TIESSEN, H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Nutrient availability in soil samples from shifting cultivation sites in the semi-arid Caatinga of NE Brazil. Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 65, p. 177-186, 1997.

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, K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANDRADE, T. S. & FONTES JÚNIOR, R. V. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.16, n.8, p.828-835. 2012.

SANTOS, R. V. dos.; CAVALCANTE, L. F. & VITAL, A de F. M. Interação salinidade-fertilidade do solo. IN: GHEYI, H. R; DIAS, N. da S. & LACERDA, C. F. de. (Eds). Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. INCTSal, Fortaleza – CE, 472p., 2010.

SILVA, M. J. Efeito de diferentes métodos de recuperação num solo com problemas de sódio no Projeto de Irrigação de São Gonçalo. PB. Viçosa: UFV, 1978. 54p. Dissertação Mestrado.

SILVA, P. C. M. & CHAVES, L. H. G. Avaliação da variabilidade espacial de atributos químicos de um solo do Perímetro Irrigado de Petrolina, PE. Agropecuária Técnica, v.27, n.1, p.5-12, 2006.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G. & LIMA, J. F. W. F. Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.10, n.1, p.76-78, 2006.

SOJKA, R. E.; BJORNEBERG, D. L.; ENTRY, J. A.; LENTZ, R. D. & ORTS, W. J. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management. Advances in Agronomy, v. 92, 2007.

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.

SPARKS, D. L. Environmental soil chemistry. New York: Academic, 1995. 267p.

SPOSITO, G. The chemistry of soils. New York: Oxford University Press, 1989. 277p.

SUASSUNA, J. & AUDRY, P. Estatísticas de salinidade das águas de irrigação do Nordeste semiárido brasileiro. IN: Reunião anual da SBPC, 45., 1993, (Recife). Anais. Recife: SBPC, 1993. p. 53-72.

SUHAYDA, C. G.; YIN, L.; REDMANN, R. E. & LI, J. Gypsum amendment improves native grass establishment on saline-alkali soils in north-east China. Soil Use and Management, v.13, p.43-47, 1997.

TORMENA, C. A. Caracterização e avaliação de intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo. Piracicaba, ESALQ/USP, 106 p. 1998. (Tese de Doutorado).

UNITED STATES SALINITY LABORATORY – USSL Staff. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington DC: US Department of Agriculture, 1954. 160 p. (USDA Agricultural Handbook, 60).

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

VALADÃO, F. C. A.; MAAS, K. D. B.; WEBER, O. L. S.; VALADÃO JUNIOR, D. D. & SILVA, T. S. Variação nos atributos do solo em sistemas de manejo com adição de cama de frango. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 35, p. 2073-2082, 2011.

VITAL, A. F. M.; SANTOS, R. V.; CAVALCANTE, L. F. & SANTOS, 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, p.30-36, 2005.

WALLACE, A. & WALLACE, G. A. Effect of polymeric soil conditioners on emergence of tomato seedlings. Soil Science v.141, p.321- 323, 1986.

WALLACE, A.; WALLACE, G. A. & ABOULAMZAM, A. M. Effects of excess levels of polymer as a soil conditioner on yields and mineral nutrition of plants. *Soil Science*, v.141, p.377-380, 1986.

WARRICK, A. W. & NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed). *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, 1980. cap. 13, p. 319-344.

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications In Soil Science Plant Analysis*. v.19, p.1467-1476, 1988.

XU, X.; NIEBER, J.L. & GUPTA, S.C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.56, n.6, p.1743-50, 1992.