

MONALIZA ALVES DOS SANTOS

**ADAPTABILIDADE E POTENCIAL FITORREMEIADOR DE ESPÉCIES
VEGETAIS EM SOLO SALINO**

RECIFE
PERNAMBUCO - BRASIL
2016

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

MONALIZA ALVES DOS SANTOS

**ADAPTABILIDADE E POTENCIAL FITORREMEIADOR DE ESPÉCIES
VEGETAIS EM SOLO SALINO**

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.

Orientadora

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

Co – Orientadores

Prof. Brivaldo Gomes de Almeida, Dr.

Prof. Alexandre Tavares da Rocha, Dr.

RECIFE
PERNAMBUCO - BRASIL
2016

Ficha catalográfica S237a Santos, Monaliza Alves dos
Adaptabilidade e potencial fitorremediador de espécies
vegetais em solo salino / Monaliza Alves dos Santos. –
Recife, 2016.

128 f. : il.

Orientadora: Maria Betânia Galvão dos Santos Freire.
Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade
Federal Rural de Pernambuco, Departamento de
Agronomia, Recife, 2016.

Referências.

1. Solos afetados por sais 2. Prolina 3. Fitoextração
4. Manejo de solos salinos I. Freire, Maria Betânia Galvão
dos Santos, orientadora II. Título
CDD 631.4

MONALIZA ALVES DOS SANTOS

**ADAPTABILIDADE E POTENCIAL FITORREMEIADOR DE ESPÉCIES
VEGETAIS EM SOLO SALINO**

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 defendida e aprovada pela banca examinadora em 26 de fevereiro de 2016

Presidente da banca:

Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

Examinadores:

Dr. Flávio Adriano Marques

Dr. Lilia Gomes Willadino

Dr. Caroline Miranda Biondi

Dr. Edivan Rodrigues de Souza

Um pouco de ciência nos afasta de Deus.

Muito, nos aproxima.

(Louis Pasteur)

*De forma especial à mamãe,
cuja fé em mim me ensinou a ter fé
em mim mesmo e em Deus.*

DEDICO E OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Na conjugação do verbo agradecer, cabe muito mais que uma palavra, ela é a expressão de gestos, momentos, ensinamentos, olhares, encontros, começos, recomeços, criações, recriações, compreensão, estender de mãos, coração aberto, mas, sobretudo seu significado se traduz em pessoas.

Aquelas que tiveram a capacidade de me olhar devagar, já que nessa vida muita gente me olhou depressa demais. As que se ocuparam em levar mensagens diversas que, ao fim, simbolizaram esperança e conhecimento. Pessoas que me ofereceram conquistas diárias, que deram polpa às minhas lacunas, encheram de alegria meus olhos, coração e dias. E a todos que acreditaram que o esforço será recompensado pela magnitude do resultado.

Nessa jornada, reconheci que o doutoramento se mescla com a capacidade de viver e originar vida. Por meio dessa metáfora, autor e obra se somam, unificando-se. Portanto, cada pessoa que na conjugação desse processo me ajudou, assim, se fez parte dele e, conseqüentemente parte de mim.

Dessa forma, aos muitos de mim, obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. O impacto da salinidade no semiárido brasileiro	2
2.2. Emprego de plantas na recuperação de solos salinos	3
2.3. Danos da salinidade em plantas	6
2.4. Mecanismos fisiológicos de tolerância ao estresse salino	7
2.5. Fotossíntese em condições de estresse	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1. Seleção de espécies vegetais	14
3.2. Área de estudo	15
3.3. Tratamentos e delineamento experimental em campo	15
3.4. Avaliação das plantas	16
3.5. Coleta e avaliação do solo	20
3.6. Análises estatísticas	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1. Composição iônica do solo.....	23
4.2. Recuperação química do solo	31
4.3. Recuperação física do solo	44
4.4. Crescimento da planta	53
4.5. Composição mineral das partes da planta	62
4.6. Solutos orgânicos	73
4.7. Potencial osmótico da planta	80
4.8. Pigmentos fotossintéticos	84
4.9. Trocas gasosas	86
5. CONCLUSÕES	96
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

ADAPTABILIDADE E POTENCIAL FITORREMEIADOR DE ESPÉCIES VEGETAIS EM SOLO SALINO

RESUMO

A recuperação de áreas degradadas por sais é uma estratégia relevante para a utilização mais adequada dos recursos naturais e produtividade agrícola. Nesse sentido, a remoção de sais por culturas tolerantes é uma alternativa viável, surgindo como uma tecnologia eficiente e de baixo custo. Espécies de plantas como a *Atriplex nummularia* têm reconhecida eficiência na recuperação de solos afetados por sais, sendo bastante disseminadas pelo mundo, no entanto, não é de conhecimento difundido no semiárido brasileiro. O estudo de espécies de maior aceitação, quanto à adaptabilidade e capacidade de recuperação de solos salinos, poderá elevar a oferta de produtos e reduzir a pressão de consumo sobre a vegetação nativa da Caatinga. Assim, este estudo foi desenvolvido com o objetivo de verificar a possibilidade de uso das espécies vegetais: sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth), leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit), nim indiano (*Azadirachta indica* A. Juss) e atriplex (*Atriplex nummularia* L.) na revegetação de áreas de solos degradados por sais, isoladamente ou em consórcio, avaliando o crescimento das plantas em campo, seu comportamento fisiológico, bem como as propriedades do solo sob o cultivo. Para isso, foram montados quatro blocos casualizados em campo, com quatro tratamentos individualizados das quatro espécies selecionadas, outros três da associação das outras três espécies com a atriplex duas a duas, e um tratamento controle (sem cultivo), totalizando oito tratamentos, em 32 parcelas experimentais. A salinidade do solo não influenciou no crescimento de atriplex, nim e leucena; contudo, reduziu os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas folhas de todas as plantas. As espécies vegetais responderam de forma diferente quanto às variáveis fisiológicas, bioquímicas e hídricas. No entanto, a implantação de todos os tratamentos promoveu melhorias na qualidade química e física do solo. A salinidade do solo (CE) e a porcentagem de sódio trocável (PST) foram significativamente reduzidas em comparação com o tratamento controle. A PST (%) e CE (dS m^{-1}) média foram 45,88 e 4,63 (controle), 9,69 e 0,96 (Atr), 17,39 e 1,64 (Atr x Leuc), 19,63 e 2,00 (Atr x Nim), 22,60 e 2,25 (Atr x Sab), 23,27 e 2,73 (Leuc), 27,72 e 3,02 (Nim) e 25,10 e 4,48 (Sab), respectivamente. Os tratamentos de fitorremediação influenciaram na redução dos níveis de Na^+ e Cl^- no solo. A melhoria nos atributos físicos foi constatada com o aumento da porosidade total e macroporosidade e redução da densidade do solo. Além disso, o efeito dos tratamentos foi comprovado pelo incremento na condutividade hidráulica, até três vezes superior ao tratamento controle, paralelamente, com o plantio das espécies, houve decréscimo de $23,68 \text{ g kg}^{-1}$ nos teores de argila dispersa em água, enquanto que no tratamento controle foi observado um comportamento contrário, havendo incremento de $18,33 \text{ g kg}^{-1}$ nos valores de argila dispersa, no decorrer do experimento. Diante do exposto as espécies *Atriplex nummularia*, *Azadirachta indica*, *Leucaena leucocephala* e *Mimosa caesalpiniiifolia* podem ser recomendadas na fitorremediação de solos afetados por sais.

Palavras-chave: solos afetados por sais, prolina, fitoextração, manejo de solos salinos

ADAPTABILITY AND PHYTOREMEDIATION POTENTIAL OF PLANT SPECIES IN SALINE SOIL

ABSTRACT

Salt degraded area reclamation is an important strategy for the optimal use of natural resources and agricultural productivity. In this sense, salt removal by tolerant crops is a viable alternative, emerging as an efficient and low cost technology. Plant species such as *Atriplex nummularia* have recognized efficiency in salt affected soils reclamation and is disseminated throughout the world, however, it has not spread knowledge in Brazilian semiarid region. The study of more accepted species, as their adaptability and ability to reclaim saline soils, can increase products supply and reduce consumer pressure on native vegetation. So, this study was carried to investigate use possibility of plant species: sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth), leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit.), neem (*Azadirachta indica* A. Juss) and oldman saltbush (*Atriplex nummularia* L.) for reforestation of salt degraded areas, in single and intercropped manure, evaluating plants growth in field, their physiological behavior and soil properties under cultivation. For this, the design utilized was in four randomized block in field, with four individualized treatments with four selected species, three intercropped treatments with the other three species and atriplex two by two, and a control treatment (no crop), totaling eight treatments, in 32 experimental plots. The soil salinity did not influence plant growth of saltbush, neem and leucena, however, it reduce the levels of K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} for all plants. Plant species responded differently for, physiological, biochemical and water relations variables. However, crop treatments promoted improvements in soil chemical and physical quality. Soil salinity (EC) and exchangeable sodium percentage (ESP) were significantly reduced compared to control treatment. Average PST (%) and EC ($dS\ m^{-1}$) were 45.88 and 4.63 (control), 9.69 and 0.96 (Atr), 17.39 and 1.64 (Atr x Leuc), 19.63 and 2.00 (Atr x Nim), 22.60 and 2.25 (Atr x Sab), 23.27 and 2.73 (Leuc), 27.72 and 3.02 (Nim), and 25.10 and 4.48 (Sab), respectively. The phytoremediation treatments reduced the levels of Na^+ e Cl^- in soil. Physical attributes improvement was found by evolution in porosity and macroporosity increasing and soil density reducing. In addition, treatments effect was evidenced by hydraulic conductivity increase, until three times higher than control, in crop treatments there was a decrease of $23.68\ g\ kg^{-1}$ in water dispersed clay, whereas in the control treatment was observed an opposite behavior, with increase of $18.33\ g\ kg^{-1}$ in clay dispersion during experiment. So, the species *Atriplex nummularia*, *Azadirachta indica*, *Leucaena leucocephala* and *Mimosa caesalpinifolia* can be recommended as phytoremediation crops in salt affected soils in Brazilian semiarid.

Key works: salt affected soils, proline, phytoextraction, saline soils management.

1. INTRODUÇÃO

O solo é um importante componente ambiental, além de condicionar os sistemas de gestão da vida animal e vegetal, é fonte de subsídio na preservação da biodiversidade terrestre, na regulação do ciclo da água, no armazenamento e na reciclagem do carbono, configurando-se como um dos principais agentes do ecossistema. As interferências antropogênicas devem considerar uma relação de interdependência, de modo a antecipar suas ações sobre o ecossistema de forma consciente. Basicamente, o meio ambiente consiste no equilíbrio entre os fatores bióticos e abióticos e, muitas vezes, perturbações abruptas em fatores promovem alteração na homeostase de organismos bióticos, criando uma condição estressante para a sobrevivência de organismos vivos (Lokhande & Suprasanna, 2012).

As tendências mundiais indicam menor estabilidade ecológica no planeta, envolvendo mais vulnerabilidade do meio ambiente a rupturas e mudanças climáticas. Sobretudo porque a exploração dos recursos naturais tem sido crescente e encontra-se num patamar muito elevado.

Esse panorama tem ocorrido no contexto atual, com o aumento das temperaturas acima do previsto, em decorrência do aquecimento global (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007; 2013), associado aos variados cenários disponíveis para as alterações climáticas, os quais sugerem um aumento da aridez em regiões semiáridas do mundo (Chaves et al., 2009), com conseqüente redução da disponibilidade de terras agricultáveis e baixa atividade econômica no setor agrícola.

Dentre as fontes de perdas de rendimento na agricultura, a salinidade corresponde a 40% juntamente com a escassez dos recursos hídricos, e são considerados os estresses abióticos mais limitantes para a produção agrícola em regiões áridas e semiáridas, onde o conteúdo de sais no solo é naturalmente elevado e a precipitação insuficiente para sua lixiviação (Zhu, 2001; Krishnapillai & Ranjan, 2005; Aslam et al., 2011, Yao et al., 2012).

Sendo assim, a exploração dos recursos naturais deve ser estabelecida primando pela sua sustentabilidade, através de medidas coerentes para evitar ou minimizar esses problemas, antes que eles se tornem incontroláveis ou que as opções de uma ação efetiva sejam seriamente reduzidas.

Portanto, esta pesquisa teve como objetivo selecionar espécies vegetais para fitorremediação de solos salinos, isoladamente ou em consórcio, avaliando a evolução do crescimento das plantas em campo, seu comportamento fisiológico, bem como alterações nas propriedades físicas e químicas do solo salino-sódico.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O impacto da salinidade no semiárido brasileiro

Os problemas econômicos e sociais na região semiárida são recorrentes, com danos ambientais impactantes sobre o equilíbrio do ecossistema. Os mananciais hídricos superficiais são escassos e mal distribuídos a nível espacial e temporal, além de apresentar irregularidade das precipitações; assim, a exploração agrícola sustentável, depende da adoção de tecnologias como a irrigação (Lima et al., 2014).

No cenário mundial, com intuito de aumentar a produção de alimentos, as áreas de terras irrigadas têm sido expandidas em vários países para atender às demandas populacionais. No entanto, a falta de um manejo adequado das práticas agrícolas faz com que haja, paralelamente, o aumento da degradação de solos, que tem se agravado ultimamente (Kabala & Janicka-Russak, 2012). A imperícia no manejo da irrigação, associada à negligência na avaliação da necessidade de drenagem do solo, aceleram o processo de degradação, resultando na salinização das terras, podendo atingir níveis prejudiciais à maioria das culturas em um espaço de tempo relativamente curto.

O aumento da área de terras com problemas de salinização em regiões áridas e semiáridas tem se tornado motivo de grande preocupação, principalmente por se concentrar em áreas irrigadas que receberam altos investimentos em infraestrutura para sua implantação (Holanda et al., 2001).

O impacto econômico da salinização não é fácil de avaliar, por causa da relação não linear entre salinização e produtividade. Logo, a salinização pode permanecer sem ser detectada durante anos com níveis moderados de salinidade, enquanto um aumento adicional pode causar abandono da terra agrícola em poucos anos (Pedrotti et al., 2015).

O acúmulo de sais em excesso, promovido pelo manejo inadequado da irrigação, eventualmente compromete a prática agrícola, uma vez que converte solos de alto potencial de produção em solos não produtivos, danificando suas propriedades e causando degradação ambiental e, conseqüentemente, impactos sociais (Souza et al., 2014).

Alguns desses solos tornam-se sódicos ou salino-sódicos, com problemas estruturais como dispersão de coloides e formação de crostas superficiais. Isso pode dificultar o movimento de água e ar no perfil do solo, diminuindo a água disponível, a disponibilidade de nutrientes, a penetração de raízes e emergência de plântulas; além de aumentar o risco de escoamento superficial de água, aumentando assim o potencial de erosão (Gharaibeh et al., 2011).

Nesse contexto, a recuperação de áreas degradadas por sais é de grande importância na atualidade, podendo trazer diversos benefícios para o semiárido nordestino, como geração de empregos e fixação do homem no campo, além da manutenção da biodiversidade peculiar da vegetação nativa da caatinga.

2.2. Emprego de plantas na recuperação de solos salinos

Solos degradados podem apresentar condições ambientais estressantes para muitas espécies vegetais, e a recuperação de ambientes salinos demanda altos investimentos, portanto, o emprego de espécies vegetais com potencial fitorremediador constitui-se uma alternativa interessante para atingir tal objetivo; quanto maiores forem as informações sobre espécies adequadas, o uso dos recursos será mais eficiente.

A maioria das espécies cultivadas, como feijão, berinjela, cebola, pimenta, milho, batata, cana de açúcar e repolho são sensíveis à salinidade (Suriyan & Chalermopol, 2009). Portanto, com o aumento percentual das terras cultivadas afetadas pela salinidade (FAO, 2002), esforços para identificação de plantas tolerantes aos sais têm importância marcante para agricultura sustentável (Pandolfi et al., 2012). Com isso, a necessidade de avaliação de algumas variáveis relacionadas ao estresse pode constituir-se um critério eficaz na seleção de plantas para cultivo em ambientes salinos (Suriyan & Chalermopol, 2009).

No decurso da evolução das espécies, algumas plantas têm se desenvolvido em habitats de elevadas concentrações salinas. Essas espécies

vegetais desenvolveram estratégias de adaptação para gerenciar as mudanças de condições ambientais, particularmente com os recursos disponíveis (Lokhande & Suprasanna, 2012).

Algumas plantas possuem naturalmente as características necessárias para crescer e se reproduzir em solos salinos, com concentrações de sais em torno de 200 Mm, sendo denominadas halófitas (Flowers & Colmer, 2008). Esse grupo representa apenas 2% das espécies de plantas terrestres, mas abrange uma ampla diversidade de formas vegetais, em torno de 50% das famílias vegetais superiores (Aslam et al., 2011).

A evidência histórica sugere que os agricultores substituam espécies sensíveis por culturas mais tolerantes, quando aumenta a salinidade no solo (Jacobsen & Adams, 1958). O fim natural de tal sucessão seria a utilização de halófitas, cujo potencial de culturas tem sido explorado, mas ainda não foi totalmente esclarecido. Assim, a domesticação de espécies nativas deve ser uma abordagem útil para a geração de culturas tolerantes aos sais no futuro, especialmente pela grande variedade de plantas halófitas disponíveis (Flowers, 2004).

Flowers & Yeo (1995) elegeram a utilização de espécies tolerantes à salinidade como uma das possíveis alternativas de solução para o problema. Estas culturas aumentam a dissolução de calcita através da atividade das raízes, resultando em níveis adequados de Ca^{2+} na solução do solo que, por sua vez, substituirá o Na^+ trocável. A remoção dos sais por parte das culturas pode contribuir significativamente para o processo de fitorremediação, quando partes das plantas colhidas não retornam ao solo (Gharaibeth et al., 2011).

O processo de fitorremediação envolve diferentes mecanismos, como: o aumento da pressão parcial de dióxido de carbono (P_{CO_2}) na zona da raiz, liberação de prótons na rizosfera de certas leguminosas e absorção de sais e transferência para a parte aérea da planta. Além disso, fitorremediação é uma tecnologia de baixo custo, que aumenta a disponibilidade de nutrientes às plantas, e pode promover a estabilidade dos agregados e melhoria das propriedades hidráulicas do solo (Qadir et al., 2006).

No Brasil, experimentos com o objetivo de fitorremediar solos afetados por sais ainda são escassos. Dentre as pesquisas que vêm sendo desenvolvidas nesse sentido, aquelas com o gênero *Atriplex* têm maior

destaque, tendo em vista as características de crescimento vegetativo e a elevada capacidade de concentrar sais.

Apesar da efetividade comprovada na recuperação de solos salinos e sódicos do Nordeste do Brasil, a atriplex ainda não tem boa aceitação pelas comunidades rurais, por ser uma espécie desconhecida. Outras plantas poderiam ser testadas em áreas degradadas, possibilitando a diversificação da vegetação, além da produção de madeira, diminuindo a pressão sobre a caatinga.

Plantas como: o sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth) e a leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit), já bastante adaptadas à região; ou mesmo outras menos conhecidas, mas que vem sendo destacadas ultimamente, como o nim (*Azadirachta indica* A. Juss.), poderiam ser testadas quanto à adaptabilidade a solos salinos e sódicos. Já que o uso de plantas para fitorremediar solos está se tornando cada vez mais presente, devido aos benefícios que propiciam às propriedades químicas e físicas do solo, além da possibilidade de um manejo sustentável e aproveitamento dos produtos advindos dos vegetais, quer seja diretamente para o agricultor e/ou, para os animais explorados na pecuária regional.

A espécie sabiá, leguminosa nativa da caatinga, já é bastante utilizada para recomposição de áreas degradadas, apresenta características ornamentais e sua madeira tem vasta aplicação. As folhas são utilizadas como fonte de alimento para o gado, especialmente durante a época seca no semiárido (Lorenzi, 2000).

A leucena é uma importante leguminosa arbórea tropical, perene, com sistema radicular profundo, que lhe confere grande resistência à seca, ocasião em que, não perdendo suas folhas, proporciona forragem verde de alta qualidade para a pecuária. O seu emprego pode ser diverso, visando desde a produção de madeira para lenha, carvão, celulose, até a sua utilização como quebra-vento, conservação e fertilidade do solo, além de se constituir em forragem de excelente valor nutritivo (Freire et al., 2010a).

O interesse pelo nim está relacionado a diversas características do seu extrato (Martins et al., 2010; Nunes et al., 2012). Contudo, estudos sobre seu desempenho em condições de salinidade são pouco frequentes na literatura. Sabe-se que sua rusticidade favorece o desenvolvimento em solos que estão degradados fisicamente, sendo uma planta que tolera longos períodos de

estiagem (Neves, 2004; Rodrigues, 2011). Silva et al. (2010) recomendaram o cultivo de nim em áreas degradadas pela salinidade, constatando 100% de sobrevivência, maior crescimento em altura e diâmetro do caule de plantas de nim em solo com condutividade elétrica de 11 d S^{-1} .

Portanto, estudos que objetivem a caracterização de plantas tolerantes a ambientes estressantes podem ser esclarecedores com perspectivas quanto ao mecanismo pelo qual esse grupo de plantas sobrevive e mantém a produtividade sob restrições abióticas.

Este conhecimento pode se tornar uma fonte potencial de novos cultivos (Colmer et al, 2005). Uma vez que a ciência sobre o comportamento ecofisiológico de espécies tolerantes à salinidade e suas adaptações ao ambiente tornam-se relevantes para distinção de quais espécies ou grupos ecológicos são mais indicados para restauração de locais degradados.

2.3. Danos da salinidade em plantas

O estresse salino é considerado um fator limitante sobre o desenvolvimento das plantas (Ashraf et al., 2008; Ashraf, 2009; Yao et al., 2012), pois está associado ao estresse osmótico (Azevedo Neto et al., 2004; Mansour et al., 2005; Chen et al., 2007; Munns & Tester, 2008; Pace et al., 2012) e a toxicidade, provocada pelo efeito iônico (Munns, 2005; Apse & Blumwald, 2007; Pace et al., 2012; Pandolfi et al., 2012), que juntos promovem distúrbios e podem comprometer significativamente a homeostase celular.

Entre os sintomas gerais de danos causados pelo estresse salino, a inibição do crescimento ocupa posição primária, esse efeito está associado à geração do estresse osmótico, oriundo da alta concentração de sais na solução do solo, o qual restringe a absorção de água e nutrientes pelas plantas (Chen et al., 2007, Pace et al., 2012). Adicionalmente, a toxicidade ocorre pelo efeito do íon específico, predominantemente provocada pelos íons cloreto, sódio ou boro (Munns, 2005), cujo acúmulo excessivo interfere na atividade das principais enzimas citosólicas, por perturbar a homeostase do potássio intracelular e causar o estresse oxidativo nas células vegetais (Ashraf & Harris 2004; Pandolfi et al., 2012). Todos estes causam efeitos adversos pleiotrópicos sobre o crescimento e desenvolvimento da planta, em níveis fisiológicos e bioquímicos (Yao et al., 2012).

Um efeito imediato do estresse osmótico sobre o crescimento da planta é a inibição da expansão celular, direta ou indiretamente por meio do ácido abscísico. O estresse salino induz à síntese de ácido abscísico, que promove o fechamento dos estômatos quando transportado para as células guarda (Zhu, 2003; 2007). Como resultado do fechamento estomático, ocorrem declínios na fotossíntese (Geissler et al., 2015), início da fotoinibição (Zhu, 2007) e estresse oxidativo (Demidchik et al., 2014).

O desbalanço nutricional é outro reflexo da salinidade, promovido pelo predomínio de alguns elementos em detrimento de outros (Amira & Abdul, 2011). Íons de sódio e cloreto em excesso podem suprimir a nutrição líquida, devido às interações iônicas com outros presentes em menores proporções (Pace et al., 2012). O sódio, por exemplo, provoca um forte efeito inibitório sobre a absorção de potássio, devido à configuração química similar entre esses dois íons (Zhu, 2003).

Os primeiros estudos de absorção de sódio em plantas mostraram dois modos de absorção do Na^+ pelas raízes, um sistema de elevada afinidade com o K^+ e outros de canais não seletivos de cátions (Apse & Blumwald, 2007). Para uma nutrição adequada, é necessário que o sistema de alta afinidade de potássio opere. Uma vez que o potássio mantém o equilíbrio elétrico e osmótico da célula, atuando na manutenção da turgescência celular e atividade enzimática (Yao et al., 2012).

Os efeitos adversos da salinidade em plantas podem ser reduzidos por nutrição mineral adequada. Um fator importante na ação entre íons de sódio e potássio é o cálcio. O fornecimento de cálcio é conhecido por manter o transporte de potássio e a seletividade potássio/sódio, melhorando o crescimento das plantas, sob condições salinas. Este efeito benéfico do cálcio é mediado por meio de uma via de sinalização intracelular que regula a expressão e atividade de transportadores de potássio (Zhu, 2007; Yao et al., 2012).

2.4. Mecanismos fisiológicos de tolerância ao estresse salino

Para a sobrevivência em condições estressantes, as plantas utilizam mecanismos de natureza bioquímica, fisiológica, morfológica e anatômica, que

auxiliam na aclimação ao estresse salino, proporcionando o seu desenvolvimento mesmo quando as condições são desfavoráveis.

Tolerância à salinidade é definida como a capacidade das plantas de crescer continuamente em condições de estresse salino (Munns, 2002). Isso faz com que os mecanismos de absorção e acúmulo de íons em diferentes órgãos vegetais constituam-se importantes fatores para determinar a sua resistência à salinidade (Ashraf et al., 2008).

Plantas geralmente respondem à salinidade em dois níveis: fisiológico e molecular (Munns & Tester, 2008), e estes processos envolvem adaptações fisiológicas, bioquímicas e estruturais (Ashraf & Harris, 2004; Chinnusamy et al., 2005; Parida & Das, 2005, Munns & Tester, 2008, Ashraf, 2009; Shabala et al., 2009). De acordo com Arzani (2008), as adaptações desenvolvidas pelas plantas são variadas, abrangendo desde os mecanismos já citados até mecanismos de eficiência de utilização de água e genéticos.

Dentre os mecanismos descritos na literatura para evitar os danos provocados pela presença de altas concentrações de sais no solo, estão: 1) a exclusão de sódio e via SOS, permitindo a homeostase iônica no citoplasma; 2) a compartimentalização vacuolar (Kabala & Janicka-Russak, 2012) e 3) o ajustamento osmótico; sendo estes os conhecidos como principais respostas das plantas à salinidade (Chaum & Kirdmanee, 2009), e alvo de pesquisas atuais.

Plantas halófitas fornecem subsídios viáveis para o estudo dos mecanismos utilizados para lidar com elevadas concentrações de sais. Servindo assim como modelos de plantas que possam ser seguidos para melhoria da tolerância à salinidade nas plantas cultivadas (Flowers & Colmer, 2008; Aslam et al., 2011; Koryo et al., 2011).

a) Exclusão de sódio pelas plantas

A nutrição de plantas depende da atividade dos transportadores da membrana, que translocam elementos do solo para a planta e mediam sua distribuição extra e intercelular (Pardo et al., 2006). O meio mais comum de sobrevivência em elevadas concentrações de sais em plantas halófitas é a exclusão de sais. Para se compreender os mecanismos de exclusão, é importante entender que, sob condições fisiológicas normais, as plantas

mantém uma elevada relação K^+/Na^+ no citosol, com concentrações de K^+ relativamente altas, variando entre 100-200 mM e baixas concentrações de Na^+ (1-10mM) (Flowers & Colmer, 2008). E estão polarizadas, devido às diferenças em concentrações de íons dentro e fora das células, resultante do funcionamento das bombas de prótons (H^+ -ATPases) da membrana (Kong et al., 2011).

Um aumento nas concentrações de Na^+ extracelular estabelece um gradiente eletroquímico potencial que irá favorecer o transporte passivo de sódio do meio externo ao citosol. No entanto, com base nos gradientes eletroquímicos relativos de cada substrato da maioria de cátions e ânions, nem todos os permutadores de cátions são considerados extrusores de Na^+ do citosol para o exterior através da membrana plasmática ou em compartimentos intracelulares (Pardo et al., 2006).

Ao nível de planta inteira, isso ocorre nas raízes; e as estrias de Caspary desempenham papel importante na exclusão de sais dos tecidos internos (Aslam et al., 2011). Ao nível celular, a exclusão de sódio citosólico através da membrana plasmática é uma das principais estratégias relacionadas com a tolerância ao excesso de sódio no meio externo (Apse & Blumwald, 2007).

Uma via essencial para a exclusão de íons de sódio das plantas foi descrita em *Arabidopsis thaliana*. Esta via, denominada SOS (salt over sensitive), consiste de três proteínas que regulam não só a entrada de Na^+ , mas também sua distribuição dentro de células radiculares e transporte para a parte aérea (Volkov, 2015).

As três proteínas de componentes formam uma unidade funcional: SOS3, uma proteína de ligação de cálcio, associada com a S/T da proteína quinase SOS2, formando um complexo SOS3/SOS2, que ativa, na membrana plasmática, um antiportador de sódio/próton (SOS1) (Oh et al., 2010).

O sistema SOS (salt overly sensitive) é conhecido como um componente crucial na defesa das plantas contra íons de sódio presentes no citoplasma, sob condições de excesso de Na^+ no citosol podem atuar na sua exclusão pelo contratransporte Na^+/H^+ (Chinnusamy et al., 2005; Oh et al., 2009).

Além de atuar no contratransporte Na^+/H^+ , como proteínas SOS1, também atuam como um sensor de plasmalema responsável pela percepção do excesso de Na^+ extracelular (Katiyar-Agarwal et al., 2007).

b) Compartimentalização vacuolar de íons

Quando as concentrações de sais no meio externo são maiores em comparação com o interior da célula, mais intenso será o movimento de sais no interior da planta e, se esta condição persistir, pode levar a uma grande deposição de sais no interior da planta (Aslam et al., 2011), com inibição das atividades de algumas enzimas (Colmer et al., 2005). Por conseguinte, as halófitas podem crescer e sobreviver em ambientes salinos pela facilidade em selecionar Na^+ e Cl^- e sequestrá-los para os vacúolos (Munns & Tester, 2008).

Plantas halófitas, que acumulam grandes quantidades de sódio no interior das células, têm suas enzimas citosólicas tão sensíveis ao sódio como enzimas de glicófitas. Dado um potencial elétrico negativo na membrana plasmática (-120 a -200 mV), um aumento no conteúdo extracelular de Na^+ irá estabelecer um gradiente eletroquímico que irá conduzir ao transporte passivo de Na^+ através da membrana plasmática, e na acumulação potencial de Na^+ no citosol de 100 a 1.000 vezes maiores do que as concentrações do espaço extracelular (apoplasto ou solução do solo) (Zhu, 2007; Aslam et al., 2011). Isto implica que, é genericamente assumido que as plantas halófitas têm de compartimentar íons sódio e cloro no vacúolo (Flowers & Colmer, 2008), de modo que suas concentrações no citoplasma sejam mantidas dentro de limites toleráveis (0 – 10 mV) (Munns & Tester, 2008).

A compartimentação vacuolar de sódio é, talvez, o mais importante mecanismo para plantas halófitas, que ativamente acumulam grandes quantidades de sódio. Uma vez que as enzimas citosólicas não são tolerantes à inibição provocada pelo sódio, é preciso que a maioria do sódio acumulado seja armazenada no vacúolo (Zhu, 2001).

O transporte de Na^+ nos vacúolos é mediado por um movimento antiporter cátion/ H^+ gerado por um gradiente eletroquímico de prótons determinado pela translocação de enzimas H^+ -vacuolar, a H^+ -ATPase e a H^+ -PPiase (Yokoi et al., 2002). Em plantas, esta exportação ocorre, geralmente, à custa de uma força criada por bombas de prótons de H^+ e é impulsionada por permutadores de Na^+/H^+ localizadas na plasmalema e membranas endossomal, a atividade antiporter Na^+/H^+ pode aumentar com a adição de Na^+ (Tester & Davenport, 2003; Jiang et al., 2010). No entanto, a compartimentalização de sódio e cloreto no vacúolo só pode ser atingida se íons de sódio e cloreto forem

transportados ativamente no vacúolo e se a permeabilidade no tonoplasto a estes íons for relativamente baixa de modo que um gradiente de concentração de íons possa ser regulado a determinado custo energético, o que pode ser mantido por meses. Por tal motivo, as proteínas e genes envolvidos nestes processos podem ser considerados como determinantes na tolerância à salinidade (Koryo et al., 2011; Kabala & Janicka-Russak, 2012).

A capacidade das células de plantas em manter baixos teores de sódio citosólicos é um fator essencial (Koryo et al., 2011), configurando a compartimentalização de íons no vacúolo como um mecanismo eficiente para evitar os efeitos tóxicos de sódio e cloreto no citosol (Apse & Blumwald, 2007), com a manutenção do potencial osmótico e condução da absorção de água em células (Lima et al., 2014).

c) Ajustamento osmótico

As halófitas são caracterizadas pela alta capacidade de ajustar o potencial hídrico do tecido a um nível que é mais negativo que o potencial hídrico do solo do habitat em que ela está crescendo. Para sobreviver às altas concentrações de sais do meio, halófitas empregam diferentes estratégias para evitar a dessecação das suas células, essas funcionam através do aumento da osmolaridade interna da célula (Koryo et al., 2011). A alteração metabólica mais comum, sob essas condições, é o acúmulo de solutos orgânicos de baixo peso molecular (Munns & Tester, 2008). Estes solutos incluem polióis lineares (glicerol, manitol ou sorbitol), polióis cíclicos (inositol ou pinitol e outros derivados de inositol), aminoácidos (glutamato ou prolina) e betaínas (glicina betaína ou betaína alanina) (Zhu, 2007).

O acúmulo desses osmólitos permite que a planta ajuste-se osmoticamente, embora a um custo metabólico, como por exemplo, provocando interferência na cinética da germinação de sementes (Ashraf et al., 2003), alteração da expansão celular e promoção do fechamento dos estômatos (Munns & Tester, 2008).

Solutos compatíveis são tipicamente hidrofílicos de modo que podem substituir a água na superfície de proteínas, complexos de proteínas, ou membranas, atuando, assim, como osmoprotetores (Nedjimi, 2014).

A homeostase osmótica ao nível celular pode resultar no sequestro de uma fração importante das substâncias tóxicas (principalmente íons

inorgânicos e orgânicos) no compartimento vacuolar, enquanto que os solutos não-tóxicos devem ser preferencialmente localizados no citoplasma, onde poderiam atuar como citosolutos compatíveis. Para manter a igualdade de potenciais osmóticos no vacúolo e no citoplasma. A compartimentação intracelular pode também estar associada com suculência, para proporcionar um maior volume no vacúolo do Na^+ armazenado (Davenport et al., 2005).

Quando as plantas estão sob estresse salino, o papel da prolina como um soluto compatível para equilíbrio do potencial osmótico no citoplasma é contribuir para estabilizar as estruturas subcelulares (como membranas e proteínas), eliminar os radicais livres, e tamponar o potencial redox celular sob condições de estresse, este é um dos mecanismos mais difundidos entre a comunidade científica, e seu papel na homeostase osmótica é motivo de controvérsia (Flowers & Colmer, 2008; Hayat et al., 2012; Zhang & Becker, 2015). A glicina betaína é um soluto compatível, também muito estudado, cujo acúmulo em resposta ao estresse osmótico, juntamente com a prolina, é considerado uma importante estratégia adaptativa ao estresse salino e hídrico (Sehrawat et al., 2015).

Espécies e variedades de plantas cultivadas são muito diferentes em relação aos tipos de solutos acumulados e sua contribuição relativa na redução do potencial osmótico. O osmólito que desempenha o papel principal na regulação osmótica é dependente da espécie (Flowers & Colmer, 2008).

Portanto a avaliação dos mecanismos de tolerância ao estresse salino configura-se como um meio eficiente e conclusivo na identificação de plantas resistentes. Embora haja um número elevado de pesquisas envolvendo tais mecanismos de plantas em ambientes controlados, estudos experimentais em condições de campo ainda são escassos. A realização de pesquisas *in situ* fornecem fontes conclusivas no comportamento das plantas enquanto componente do meio, podendo influir positivamente na seleção de espécies vegetais para o manejo de áreas afetadas por sais.

2.5. Fotossíntese em condições de estresse

Ambientes estressantes, como salinidade, secas e altas temperaturas, impõem alterações sobre a sistemática de processos fisiológicos, bioquímicos e moleculares em plantas. A fotossíntese, o mais fundamental e intrincado

processo fisiológico das espécies vegetais, também é gravemente afetado em todas as suas fases (Ashraf & Harris, 2013).

O mecanismo da fotossíntese envolve vários componentes, incluindo pigmentos fotossintéticos e fotossistemas, o sistema de transporte de elétrons e vias de redução de CO₂. É uma característica inerente ao vegetal, uma vez que é por meio dela que a planta produz fotoassimilados indispensáveis ao seu desenvolvimento. Portanto, qualquer dano em qualquer nível causado por um estresse pode reduzir a capacidade global fotossintética de uma planta (Ashraf & Harris, 2013; Taiz & Zaiger, 2013).

Dentre os fatores mais limitantes, a escassez hídrica e a salinidade promovem maior impacto sobre os processos fotossintéticos. A resposta fotossintética à seca e ao estresse salino é altamente complexa. E assim configura-se, uma vez que envolve uma gama de interações na célula vegetal, as quais estão relacionadas às características do desenvolvimento da própria planta, à intensidade e ao tempo de exposição ao estresse. Esses fatores irão ditar se os processos de mitigação associadas à aclimação irão ocorrer ou não (Chaves et al., 2011).

São vários os efeitos associados ao estresse sobre a fotossíntese, e esses podem influenciá-la de forma primária ou secundária. Os efeitos diretos promovem alterações sobre os fotossistemas (Taiz & Zeiger, 2013), pigmentos fotossintéticos (Omoto et al., 2010; Kannan & Kulandaivelu, 2011), componentes do sistema de transporte de elétrons (Mittal et al. 2012) e mudanças em várias características de trocas gasosas (Flexas et al., 2008). Já os efeitos secundários traduzem-se como estresse oxidativo (Azevedo-Neto et al., 2006; Parvaiz & Satyawati, 2008).

A redução do potencial hídrico exerce influência negativa sobre a expansão celular, diminuindo a sua velocidade, e afetando, conseqüentemente, o crescimento da folha. À medida que o tempo de exposição ao estresse aumenta, o fechamento estomático é afetado e, conseqüentemente, é inibida a atividade de fixação do carbono fotossintético (Flexas et al., 2009).

Em condições salinas, a capacidade fotossintética da planta responde distintamente de acordo com o tempo de exposição ao estresse. Em curto prazo, as alterações assemelham-se ao do estresse hídrico, devido ao efeito osmótico promovido pela concentração de sais na solução do solo. À medida que as plantas são expostas à salinidade por maiores períodos, as respostas

são expressas por íon toxicidade, que inibem severamente muitas enzimas fotossintéticas (Munns et al., 2006).

Os pigmentos fotossintéticos são severamente afetados pelo estresse salino, devido à degradação da clorofila, efeito atribuído ao aumento do nível de toxidez por Na⁺. Essas alterações induzidas pela salinidade sobre o teor de clorofila na folha podem ocorrer devido à biossíntese deficiente ou à degradação acelerada do pigmento (Ashraf & Harris, 2013).

Como consequência do efeito deletério da seca e da salinidade sobre os pigmentos fotossintéticos, também são observadas alterações nos fotossistemas. O mais ativo dos tecidos fotossintéticos das plantas superiores é o mesófilo, o qual possui os pigmentos especializados na absorção da luz. Nos cloroplastos, a energia luminosa é convertida em energia química por meio dos fotossistemas. A luz absorvida é utilizada para impulsionar a transferência de elétrons. Nesse sentido, entende-se que os fatores de estresse atuam promovendo a depleção da eficiência absorção de luz dos fotossistemas e, portanto, afetando negativamente a capacidade fotossintética (Taiz & Zeiger, 2010; Zhang et al., 2011).

Diante do conhecimento das respostas da fotossíntese aos agentes de estresse, é possível iniciar a compreensão de algumas expressões das plantas perante uma série de intempéries a que são expostas e, com isso, possivelmente estabelecer uma gestão eficiente na agricultura.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Seleção de espécies vegetais

Com o objetivo de testar a adaptabilidade a solos salinos e sódicos, foram selecionadas três espécies vegetais muito encontradas no semiárido de Pernambuco e bem aceitas pela população rural; o sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth), a leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit) e o nim (*Azadirachta indica* A. Juss.). Estas foram comparadas à atriplex (*Atriplex nummularia* Lindl.), que já vem sendo utilizada em outras áreas degradadas e com efetividade comprovada na recuperação de solos salinos por fitorremediação.

3.2. Área de estudo

Inicialmente, foi realizada a seleção da área, por meio de visitas a lotes do Perímetro Irrigado Cachoeira II (Serra Talhada, PE), situado nas coordenadas geográficas 7° 58' 54" a 8° 01' 36" de Latitude Sul e 38° 18' 24" a 38° 21' 21" de Longitude Oeste, e coleta de amostras de solo. Foi assim identificada uma área degradada, sem uso agrícola e sem acúmulo excessivo de sais, pois isso poderia impossibilitar o estabelecimento de alguma das espécies a serem testadas. Dessa forma, foi selecionada uma parcela no lote 4P, área que estava sem uso agrícola há oito anos, pelo nível de degradação, onde anteriormente havia cultivo de bananeiras irrigadas.

A área é plana, com pequenos desníveis, mas com sérios problemas de infiltração de água, apesar do predomínio de areia na composição granulométrica do solo. Conforme almejado, a salinidade ainda não estava muito avançada, havia maiores problemas quanto às propriedades físicas do solo, adensamento das partículas, causando restrições à penetração de raízes e ao movimento de água e ar no perfil do solo.

3.3. Tratamentos e delineamento experimental em campo

A área experimental foi dividida em quatro blocos casualizados, com oito tratamentos, contabilizando 32 parcelas experimentais. Cada parcela foi dimensionada em 8 x 8 m (64 m²) e a parcela útil foi de 4 x 4 m (16 m²).

Foram definidos os tratamentos como: *4 tratamentos individualizados*, sendo plantadas as quatro espécies selecionadas (atriplex, leucena, nim e sabiá), uma em cada parcela sob cultivo isolado; *3 tratamentos em associação*, com as espécies sob cultivo consorciado, sendo as três espécies (sabiá, leucena e nim) plantadas, cada uma, em associação com a atriplex; e *1 tratamento controle*, sem cultivo, totalizando os oito tratamentos. O espaçamento de plantio foi de 2 x 2 m, contabilizando 16 plantas por parcela e 4 plantas na parcela útil.

As mudas foram transplantadas para o campo, em novembro de 2013, quando estavam em média com 30 cm de altura (atriplex, nim e sabiá) e 40 cm (leucena), para covas nas dimensões 30 x 30 x 30 cm, sem adição de nenhum composto orgânico ou químico. Foi realizada uma irrigação semanal das mudas, até 60 dias após o transplante, com água disponibilizada no lote,

bombeada diretamente do rio Pajeú. Foi feita uma amostragem da água e realizada análises para classificação quanto ao perigo de salinidade e sodicidade, de acordo com a classificação proposta em USSL Staff (1954) (Tabela 1).

Tabela 1. Valores de pH, condutividade elétrica (CE), cátions solúveis (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}), relação de adsorção de sódio (RAS), e classificação da água para irrigação quanto ao risco de salinidade e sodicidade

pH	CE	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	RAS	Risco ¹
	dS m^{-1}	$\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$				$(\text{mmol}_c \text{L}^{-1})^{0,5}$	
7,89	1,28	19,25	0,25	2,30	0,23	17,11	C3S2 Alto/Médio

¹Conforme USSL Staff (1954).

3.4. Avaliação das plantas

Foi realizado o acompanhamento do crescimento das plantas, avaliando-se altura e área da copa, na ocasião do transplante e em intervalos de 30 dias, até os 18 meses. Durante este período, as plantas foram mantidas apenas com a água da precipitação, conforme dados climatológicos obtidos pela APAC (2016) em estação no município de Serra Talhada (Figura 1).

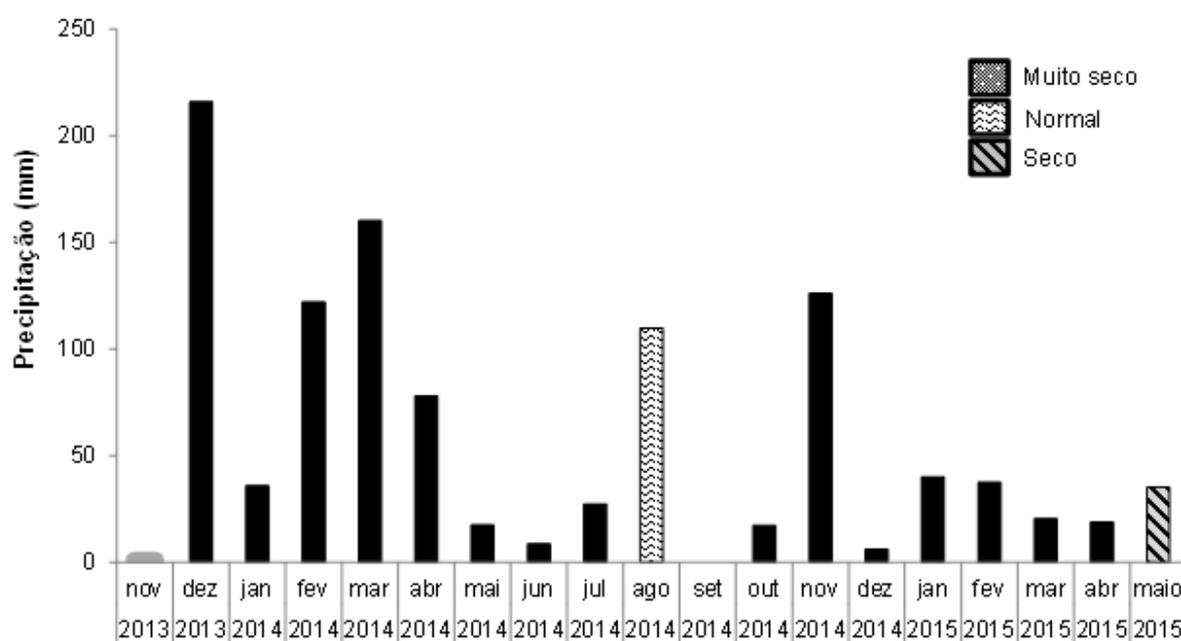


Figura 1. Médias de precipitação mensal e classificação do clima nas épocas de amostragens registradas nas proximidades da área experimental (APAC, 2016).

Para mensurar a área de copa foram realizadas duas medições da projeção da copa, sendo a primeira no sentido da linha de plantio e a segunda no sentido transversal a esta, em seguida a área de copa foi calculada utilizando-se a fórmula da elipse (Leles et al., 2011):

$$AC = Lxl \frac{\pi}{4}$$

onde: AC = área da copa; L = comprimento da maior largura da copa; l = comprimento da linha perpendicular à linha de maior largura; e π = constante 3,1415.

Aos seis, nove e dezoito meses da montagem do experimento, foram realizadas amostragens de galhos e folhas nas plantas das espécies estudadas, sendo o material vegetal acondicionado em sacos de papel e transportado ao laboratório. A biomassa obtida foi fracionada em folhas e ramos, para as plantas de atriplex. Para as plantas de nim e sabiá, a massa constou apenas de folhas; e, nas plantas de leucena aos nove e 18 meses, foram obtidas a massa foliar, inflorescências, frutos e sementes.

O material vegetal coletado foi pesado e seco em estufa com circulação forçada de ar a 65°C, até peso constante. Sendo pesado para obtenção das massas fresca e seca da parte podada das plantas.

3.4.1. Estado nutricional do tecido vegetal

A massa seca de cada parte da planta foi moída em moinho tipo Willey e submetida à digestão nitroperclórica (Silva, 2009), para posterior execução das determinações dos teores de Na⁺, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺. Sendo os cátions Na⁺ e K⁺ dosados por fotometria de emissão de chama; e Ca²⁺ e Mg²⁺ por espectrofotometria de absorção atômica. O cloreto foi determinado em extrato aquoso por titulação com nitrato de prata, conforme método descrito por Malavolta et al. (1997).

3.4.2. Potencial osmótico foliar

Para a extração da seiva do tecido foliar, foram coletadas folhas do terço médio das plantas, que foram maceradas em almofariz com pistilo. Após a

maceração, a seiva obtida do tecido foi filtrada e colocada em tubo tipo “Eppendorf” para centrifugação a 25.000 g por 10 min a 4°C. Uma alíquota de 10 µL do sobrenadante foi utilizada para determinação da osmolalidade do tecido foliar usando-se um osmômetro de pressão de vapor, modelo Wescor 5520.

Os valores do potencial osmótico foram obtidos a partir da osmolalidade (mmol kg^{-1}) da seiva do tecido foliar, mediante o uso da equação de Van't Hoff (Reichardt & Timm, 2004), expressando-se os resultados em MPa.

3.4.3. Análises fisiológicas e bioquímicas

a) Relações hídricas: potencial hídrico foliar

O potencial hídrico foliar foi avaliado, ao final do experimento, em campo no horário de antemanhã, entre às 3h00min e 5h00min, utilizando-se folhas completamente expandidas localizadas no terço médio da planta. De modo a evitar a perda de água, à medida que iam sendo coletadas as folhas, imediatamente foram realizadas as leituras na câmara de pressão de Schollander: Modelo 1515D Pressure Chamber Instrument - PMS Instrument Company, seguindo método descrito por Scholander et al. (1965).

b) Determinação de pigmentos fotossintetizantes

Os teores de clorofilas a, b, total e carotenoides foram determinados pelo método destrutivo. Para isto, coletou-se 0,1 g de matéria fresca de folhas das plantas em cada parcela, que foram cortadas em pequenos pedaços e dispostas em tubos de ensaio rosqueados, cobertos com papel alumínio para evitar a passagem de luz, adicionando-se 10 mL de acetona a 80% e armazenando-se sob refrigeração.

Após um período máximo de 48h foram quantificados os teores de clorofila a, b, total e carotenoides, de acordo com a metodologia de Arnon (1949), nos comprimentos de onda 664 nm, 649 nm e 470 nm, com o uso do espectrofotômetro. Os valores foram calculados pelas fórmulas descritas abaixo e os resultados expressos em miligrama de clorofila por grama de matéria fresca (mg g^{-1} MF):

$$\text{Clorofila } _a = 13,36 \times A_{664} - 5,19 \times A_{649}$$

$$\text{Clorofila } _b = 27,43 \times A_{649} - 8,12 \times A_{664}$$

$$\text{Clorofila } _{total} = (\text{Clorofila } _a) + (\text{Clorofila } _b)$$

$$\text{Carotenoides} = \left[1000 \times A_{470} - 2,13(\text{Clorofila } _a) - 97,64 \frac{(\text{Clorofila } _b)}{209} \right]$$

c) Determinação de solutos orgânicos

Para a determinação dos solutos orgânicos foi coletado, aproximadamente, 1 g de matéria fresca de folha em todos os tratamentos. A massa foliar obtida foi macerada em N₂ e adicionados 4 mL de solução tampão de fosfato monobásico (pH=7,0) a 0,1 mol L⁻¹, o extrato foi filtrado e armazenado. Em seguida, foram centrifugados a 10.000 rpm por 10 minutos a uma temperatura de 4°C, coletando-se o sobrenadante, o qual foi transferido para tubos tipo “eppendorf”. Este extrato foi armazenado para posterior determinação dos solutos orgânicos.

Os carboidratos livres totais foram determinados pelo método de fenol-ácido sulfúrico (Dubois et al., 2004); teores de proteínas solúveis pelo método da ligação ao corante coomassie brilliant blue (Bradford, 1976), os aminoácidos, pelo método da ninhidrina (Yemm & Cocking, 1955), a concentração de prolina livre foi determinada aplicando-se o método da ninhidrina e ácido fosfórico, proposto por Bates et al. (1973). As concentrações dos solutos orgânicos foram expressas em mol g⁻¹ MF.

d) Trocas gasosas

Durante o experimento, as plantas foram monitoradas em duas épocas; aos 9 e aos 18 meses após o transplântio. As medições das trocas gasosas foram realizadas entre os horários de 09h00min e 12h00min, a concentração de CO₂ no ar durante as medições foi fixada em 400 ± 5 µmol⁻¹. A fotossíntese líquida (A), transpiração (E) e condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci) e concentração interna e externa de CO₂ foram mensurados pelo analisador de gás a infravermelho IRGA (LI-COR Nebraska, USA) modelo LI-6400xt. Foi calculada, também, a eficiência do uso de água, através da relação da fotossíntese e transpiração (EUA).

Para as avaliações foram utilizadas folhas completamente expandidas, localizadas no terço médio superior das plantas.

3.5. Coleta e avaliação do solo

As coletas de solo foram realizadas a uma distância lateral de 0,5 m em relação ao caule da planta. Para o tratamento controle, como não havia plantas cultivadas, o centro da parcela serviu como referência para as distâncias do caule, sendo as amostragens de solo realizadas também na parcela útil.

Foram realizadas quatro amostragens: no momento da montagem do experimento (Novembro de 2013), aos nove meses (agosto de 2014) e dezoito meses (maio de 2015) de montagem do experimento. Nas três amostragens de solo, foram coletadas amostras com estrutura deformada, em três camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm. No início e no final do experimento, foram também coletadas amostras com estrutura preservada, em cilindros volumétricos, nas profundidades de 0-5, 15-20 e 40-45 cm. As amostras de solo com estrutura deformada e preservada foram coletas no mesmo ponto amostral.

Após a coleta, as amostras de solo com estrutura deformada foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm, obtendo-se assim a terra fina seca ao ar (TFSA), e reservadas para a realização das análises químicas.

3.5.1. Análises químicas do solo

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

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

troca de cátions (CTC), pelo método do acetato de sódio/acetato de amônio (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 (1954). No momento da escolha do campo experimental, foi realizada uma coleta de solo para caracterização química prévia à instalação do experimento (Tabela 2).

Tabela 2. Características químicas do solo da área experimental antes da implantação dos tratamentos.

CEes ¹	pH ²	Complexo sortivo				CTC ³	PST ⁴
		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺		
dS m ⁻¹	(1:2,5)	cmolc kg ⁻¹					%
5,48	7,23	5,99	1,05	1,59	0,68	9,51	62,98

¹ Condutividade elétrica do extrato de saturação; ² Potencial hidrogeniônico do dolo; ³ Capacidade de troca de cátions; ⁴ Percentagem de sódio trocável.

3.5.2. Análises físicas do solo

Na caracterização física do solo foram determinados a composição granulométrica e argila dispersa em água, pelo método da pipeta com agitação durante 16 h, em agitador rotatório tipo Wagner, a 50 rpm, por método proposto por Ruiz (2005) (Tabela 3).

Tabela 3. Composição granulométrica (n = 64 amostras) e densidade de partículas (Dp) do solo da área experimental

Camada	Composição granulométrica					Dp
	Areia			Silte	Argila Total	
	Grossa	Fina	Total			
cm	g kg ⁻¹					Mg m ⁻³
5	70,29	757,62	827,91	77,63	94,45	2,17
15	46,85	704,64	751,50	66,14	182,35	2,17
45	35,27	675,87	711,15	79,53	209,31	2,16

A densidade do solo foi determinada utilizando-se amostras de solo não deformadas, coletadas em cilindros volumétricos, seguindo método descrito

pela EMBRAPA (1997). A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997).

Foram ainda determinados: a condutividade hidráulica em meio saturado com o permeâmetro de coluna vertical e carga constante, e a umidade na capacidade de campo (EMBRAPA, 1997). Posteriormente à condutividade hidráulica em meio saturado, as amostras foram saturadas por capilaridade durante 24 horas e submetidas a diferentes tensões de água no solo: -10, -60 e -100 cm de coluna d'água em mesa de tensão, para avaliação da porosidade total (Pt) e separação em macro e microporos. Com os dados de argila total e argila dispersa em água, foram calculados os índices de dispersão (ID).

3.6. Análises estatísticas

Os resultados obtidos foram avaliados segundo a influência dos tratamentos e entre as épocas de coleta. As variáveis avaliadas foram submetidas à análise da variância. Para as variáveis significativas, as médias obtidas foram submetidas ao teste de Tukey a 5% de probabilidade, comparando-se os tratamentos e seus efeitos na melhoria das propriedades dos solos.

Os resultados analíticos das variáveis de solo; Condutividade elétrica e Potencial osmótico foram avaliados por análises de Correlação de Pearson ao nível de 5% de probabilidade de confiança ($P < 0,05$). Da mesma forma, foi realizada a correlação simples para as combinações, duas a duas, entre os atributos das trocas gasosas ao nível de probabilidade de 1% ($P < 0,01$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Composição iônica do solo

Os valores médios dos cátions no complexo de troca do solo em função dos tratamentos nas três avaliações de solos realizadas estão apresentados na Tabela 4. Numa análise geral, verifica-se que houve alteração em função do tempo, o que pode estar relacionado com o volume e a frequência de precipitação ocorrida entre cada fase experimental (Figura 1). Entre a primeira e a segunda avaliações (0 e 9 meses), houve um período de precipitação constante, com menores valores dos cátions trocáveis na segunda amostragem. Contudo, o período entre a segunda e a terceira amostragem foi de pouca precipitação pluvial, contribuindo para o aumento dos cátions no complexo de troca do solo (Tabela 4). Dessa forma, é relevante avaliar a dinâmica de sais no solo considerando, inclusive, sua interação com os diversos fatores edafoclimáticos.

A participação de íons salinos no solo é um processo natural, no entanto as suas concentrações estão associadas a fatores como material de origem, presença de matéria orgânica, adubação, manejo, às condições climáticas das regiões e as relações estabelecidas entre os íons (Qadir et al., 2007; Ravindran, et al., 2007).

No início do experimento (tempo zero) foi observado o predomínio do sódio no complexo de troca em relação aos demais cátions trocáveis (Tabela 4). Posteriormente, a situação se inverte, sendo o cálcio o cátion predominante no solo da segunda e, especialmente, da terceira amostragem. Em parte, isso pode ser atribuído às diferenças na precipitação, todavia, houve também a interferência dos tratamentos utilizados, em que o controle permaneceu com maior teor de sódio e o menor de cálcio aos 18 meses do experimento.

Nos solos da primeira amostragem, realizada na ocasião do transplântio, só foram detectadas pequenas diferenças para o sódio entre os tratamentos (Tabela 4). Essas diferenças podem ter ocorrido em função da variabilidade da área que, mesmo pequena, apresentava variações. Entretanto, isso foi sendo alterado com o tempo em função das plantas cultivadas em cada parcela, sendo diferentes estatisticamente ($P < 0,05$) do tratamento controle.

Tabela 4. Teores de Na⁺, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis no solo cultivado com atriplex, leucena, nim e sabiá, isoladas e em consórcio, e solo sem cultivo, aos 0, 9 e 18 meses após o transplântio

Tratamento	Meses após o transplântio		
	0	9	18
Na⁺ (cmol_c kg⁻¹)			
Atriplex	2,41B	1,04B	1,08C
Atriplex x Leucena	2,41B	0,70C	1,60C
Atriplex x Nim	2,45B	0,53C	1,66C
Atriplex x Sabiá	3,00AB	0,85C	2,13BC
Leucena	2,55B	1,02B	2,55BC
Nim	3,61A	1,31AB	2,99B
Sabiá	3,37A	0,83C	2,57B
Controle	3,97A	1,98A	5,16A
K⁺ (cmol_c kg⁻¹)			
Atriplex	1,67A	1,03A	1,57A
Atriplex x Leucena	1,67A	1,05A	1,12A
Atriplex x Nim	1,60A	0,98A	0,93AB
Atriplex x Sabiá	1,89A	0,93A	1,11A
Leucena	1,75A	0,94A	1,13A
Nim	1,93A	0,98A	1,08A
Sabiá	1,72A	1,05A	0,89AB
Controle	1,74A	1,09A	0,72B
Ca²⁺ (cmol_c kg⁻¹)			
Atriplex	1,58A	1,36A	3,13A
Atriplex x Leucena	1,32A	1,39A	3,05A
Atriplex x Nim	1,55A	1,19A	3,10A
Atriplex x Sabiá	1,68A	1,69A	3,61A
Leucena	1,42A	1,20A	3,06A
Nim	1,64A	1,30A	3,38A
Sabiá	1,54A	1,14A	3,06A
Controle	1,90A	1,24A	1,46B
Mg²⁺ (cmol_c kg⁻¹)			
Atriplex	0,70A	0,38A	0,61A
Atriplex x Leucena	0,68A	0,40A	0,74A
Atriplex x Nim	0,73A	0,35A	0,65A
Atriplex x Sabiá	0,63A	0,47A	0,66A
Leucena	0,61A	0,35A	0,92A
Nim	0,66A	0,48A	0,99A
Sabiá	0,71A	0,44A	1,17A
Controle	0,68A	0,40A	0,93A

Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre os tratamentos.

No final do estudo (18 meses), a média de redução em relação aos teores originais foi de 55% para o tratamento com atriplex em cultivo isolado, 34% para o consórcio de atriplex com leucena, 32% para o consórcio atriplex e nim,

29% para o consórcio atriplex e sabiá, 17% e 24% para os tratamentos nim e sabiá, respectivamente. Contrariamente, no tratamento controle foi observado um aumento do teor de Na^+ ao longo do tempo, com um incremento de 30% em relação aos valores encontrados no solo no período de implantação do estudo.

As reduções nos teores de sódio nos tratamentos com emprego das plantas estão associadas à absorção desse íon, adicionalmente, a presença de plantas também fornece outros benefícios, pelo estímulo à atividade biológica na zona radicular, que eleva a concentração de CO_2 e a taxa de dissolução de carbonatos, a um nível suficiente para a remoção de parte do Na^+ trocável, deixando-o livre na solução para que seja lixiviado, contribuindo para a correção do solo (Carmona et al., 2010). Nesse sentido, o cultivo dessas espécies pode ser utilizado para avaliar a viabilidade global da agricultura em ambientes salinos (Hasanuzzaman et al., 2014).

Leal et al. (2008) observaram reduções significativas de sódio em solo salino sódico irrigado com águas salinas (0,175; 0,500 e 1,500 dS m^{-1}), após 100 dias de cultivo com a *Atriplex nummularia*, em ambiente controlado, e caracterizaram o comportamento da planta como hiperacumuladora de sódio com potencial de uso na fitoextração deste elemento no solo. Igualmente, Souza et al. (2011) evidenciou a diminuição do sódio trocável no solo, com cultivo em campo de *Atriplex nummularia* e ressalta a eficiência da planta na extração de sais e recuperação do solo.

Observou-se, também, que na última amostragem de solo, os teores de Ca^{2+} foram bastante elevados (Tabela 4), provavelmente, pela dissolução de minerais liberando este cátion, em função da elevada precipitação verificada no período anterior aos 18 MAT. Contudo, houve a contribuição significativa do estabelecimento vegetal na área, pois no tratamento controle os teores de Ca^{2+} permaneceram baixos.

Embora não tenha sido realizada análise mineralógica do solo, sabe-se que no processo de fitorremediação de solos afetados por sais, as plantas atuam na liberação de cálcio e magnésio de minerais presentes no solo como a calcita, por meio da acidificação do solo próximo ao sistema radicular das plantas e assim com contribuição percentual nos teores dos elementos (Qadir et al., 2007).

Em 18 meses, o cultivo das espécies de plantas utilizadas, isoladamente ou em consórcio, promoveu melhorias ao equilíbrio de cátions no solo, uma vez que possibilitou a diminuição dos teores de sódio e aumentou os de potássio e cálcio, sendo os dois últimos nutrientes vegetais e o primeiro um elemento que pode causar toxidez a maioria das plantas, bem como problemas no solo. Quanto ao magnésio, não foram observadas diferenças, possivelmente pelos baixos teores encontrados, o que dificultou sua presença no complexo de troca do solo pela competição com os demais cátions.

A variação em profundidade do Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis (Figura 2) evidencia o aumento dos teores de desses íons em camadas mais profundas do perfil, mais pronunciada aos 9 MAT, associado às precipitações ocorridas nos meses anteriores a esta amostragem (Figura 1). Por sua vez, isso deve estar associado à migração de coloides ao longo do perfil.

Ao final do experimento, os teores de sódio foram menores em superfície, provavelmente, devido à absorção deste elemento pelas plantas (Figura 2). Contrariamente, os teores de potássio aumentaram relativamente às outras épocas de amostragem, esse incremento relaciona-se à redução do Na^+ , que promove um efeito antagônico a este íon. Quanto ao cálcio e magnésio, as concentrações mantiveram-se mais equilibradas entre as camadas do solo.

A salinidade compromete a fertilidade do solo, promovendo desordens nutricionais nas plantas submetidas ao cultivo em ambientes com excesso de sais, afetando inclusive o desenvolvimento vegetal e a disponibilidade de nutrientes para as plantas (Freire & Freire, 2007). Os cátions de sais solúveis normalmente encontrados em ambientes salinos são: sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}). Os ânions são: cloreto (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), carbonato (CO_3^{2-}) e bicarbonato (HCO_3^-). Sendo o sódio o íon dominante entre os cátions e o cloreto entre os ânions, compreendendo cerca de 50 a 80% do total de sais solúveis (Tavakkoli et al., 2011).

Isso foi observado no presente estudo, antes da implantação do experimento, em que os teores dos íons de sódio e cloro foram superiores aos demais íons avaliados (Tabela 5). A diminuição na disponibilidade dos íons cálcio, magnésio e potássio é comum, em função do aumento da concentração de Na^+ na solução do solo, causando um desbalanço na relação entre eles. Nesse contexto, é possível que a precipitação do cálcio e do magnésio, menos solúveis, faça com que as concentrações destes sejam diminuídas no extrato

de saturação do solo (Freire & Freire, 2007; Gonçalves et al., 2011). Semelhantemente aos cátions trocáveis, a redução observada nos teores de sódio solúvel nas fases subsequentes, resultou na variação das concentrações de cálcio, magnésio e potássio (Tabela 5).

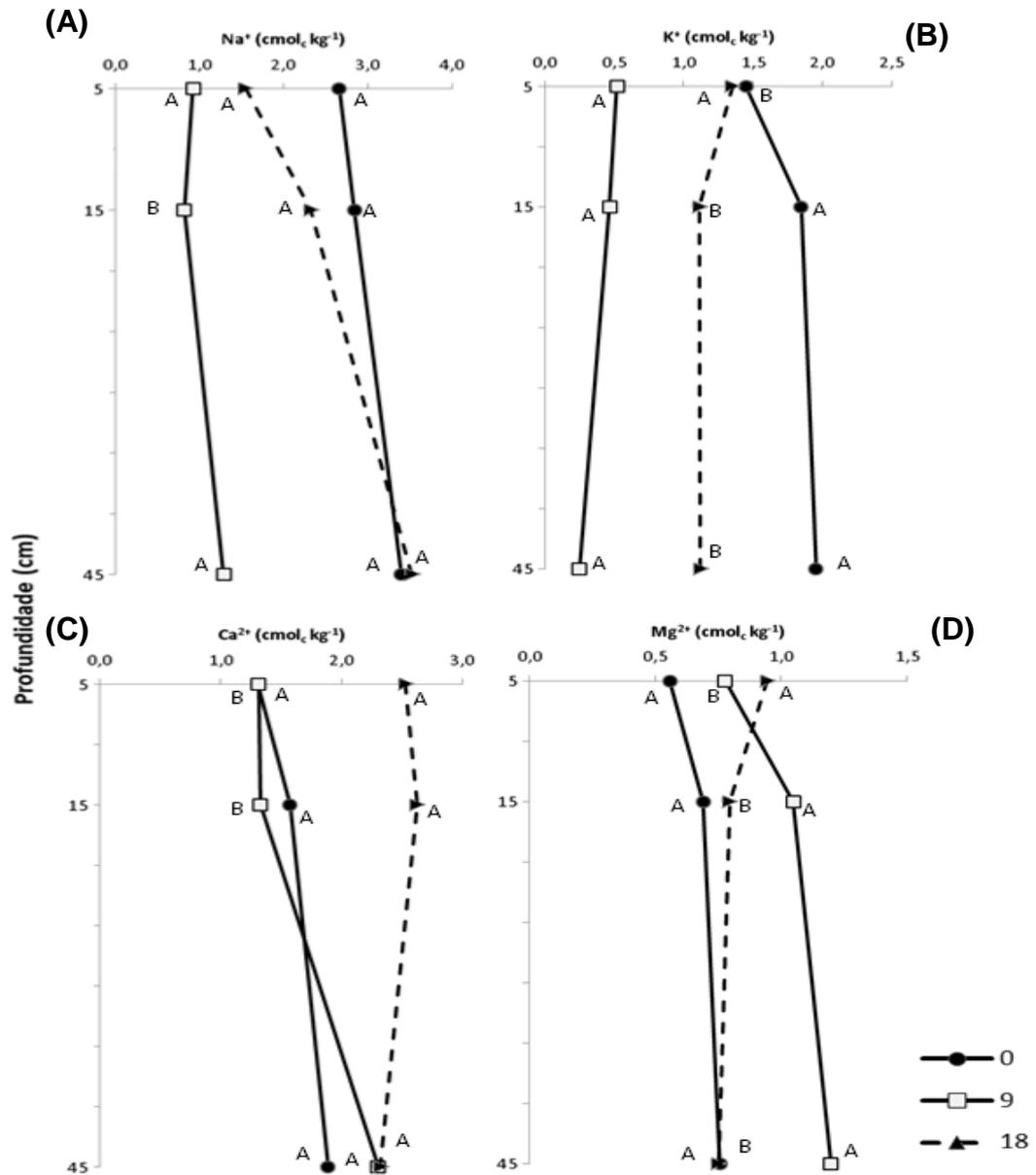


Figura 2. Teores dos cátions trocáveis Na⁺ (A), K⁺ (B), Ca²⁺ (C) e Mg²⁺ (D) aos 0, 9 e 18 MAT nas camadas 0-10, 10-30 e 30-60 cm. Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre as camadas do solo.

Tabela 5. Teores de Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Cl⁻ solúveis no solo cultivado com atriplex, leucena, nim e sabiá, isoladas e em consórcio, e solo sem cultivo, aos 0, 9 e 18 meses após o transplântio

Tratamento	Meses após o transplântio		
	0	9	18
Na⁺ (mmol_c L⁻¹)			
Atriplex	37,59 A	19,78B	17,37C
Atriplex x Leucena	36,42A	17,01B	24,00B
Atriplex x Nim	26,80B	25,07AB	23,39B
Atriplex x Sabiá	32,16A	26,10AB	24,95B
Leucena	24,59B	25,15AB	51,67A
Nim	33,70A	31,39A	27,30B
Sabiá	33,77A	23,57AB	28,60B
Controle	26,50B	24,96AB	64,30A
K⁺ (mmol_c L⁻¹)			
Atriplex	19,00A	17,68B	28,28A
Atriplex x Leucena	15,06B	12,10B	22,53AB
Atriplex x Nim	17,50B	14,28B	16,56B
Atriplex x Sabiá	18,66B	16,29B	21,41AB
Leucena	12,71B	15,05B	21,37AB
Nim	21,01A	16,76B	24,46AB
Sabiá	15,19B	14,25B	24,25AB
Controle	18,32AB	21,19A	23,30AB
Ca²⁺ (mmol_c L⁻¹)			
Atriplex	3,00A	23,29A	21,24A
Atriplex x Leucena	3,43A	25,85A	15,25B
Atriplex x Nim	3,36A	15,85B	15,13B
Atriplex x Sabiá	2,82A	15,48B	19,51A
Leucena	2,92A	15,46B	18,35A
Nim	2,86A	17,29B	15,44B
Sabiá	3,08A	12,54B	14,92B
Controle	3,10A	19,00AB	13,20C
Mg²⁺ (mmol_c L⁻¹)			
Atriplex	0,81B	1,05A	0,62A
Atriplex x Leucena	0,84B	0,96A	0,59A
Atriplex x Nim	1,25A	1,81A	0,62A
Atriplex x Sabiá	1,24A	1,08A	0,66A
Leucena	1,12A	1,08A	0,60A
Nim	0,98B	1,64A	0,65A
Sabiá	1,27A	1,13A	0,63A
Controle	1,29A	1,71A	0,69A
Cl⁻ (mmol_c L⁻¹)			
Atriplex	48,63A	15,41A	23,82A
Atriplex x Leucena	42,96A	17,38A	38,65A
Atriplex x Nim	52,00A	12,76A	32,10A
Atriplex x Sabiá	53,00A	13,90A	33,68A
Leucena	46,83A	14,22A	28,28A
Nim	47,21A	18,10A	47,18A
Sabiá	46,42A	13,23A	25,47A
Controle	42,17A	18,88A	70,33A

Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre os tratamentos.

Ao final do experimento (18 meses), os teores de sódio e cloro diminuíram. O destaque foi para o tratamento Atriplex, onde foi expressa uma taxa de decréscimo desses dois íons duas vezes maior comparativamente à

primeira coleta. Contrariamente, no tratamento controle houve um acréscimo de sódio e cloro na solução do solo. No entanto, apenas os teores de sódio foram diferentes significativamente aos 18 MAT. O coeficiente de variação para os teores de cloro foi muito elevado (CV=128%), possivelmente, isso impossibilitou que fosse observada diferença significativa entre os tratamentos sobre esta variável.

Assim como no presente estudo, a dinâmica de íons em solo salino sódico com *Atriplex nummularia* também foi avaliada por Santos et al. (2013), e de igual modo, observaram que o cultivo da espécie foi favorável à diminuição dos íons sódio e cloro no solo. Concluindo que o emprego da atriplex configura-se como alternativa com potencial de uso na fitoextração, principalmente de sódio e cloro de solos afetados por sais.

Com relação à variação dos teores de sódio, potássio, cálcio e magnésio, na solução do solo, nas camadas avaliadas, foram registradas diferenças entre os horizontes, com maiores concentrações de sódio e cloro na camada superficial (0-10 cm) e subsuperficial do solo (30-60 cm) (Figura 3A e 4), enquanto as maiores concentrações de potássio mantiveram-se na camada superficial (Figura 3B). Os altos teores de potássio podem ser atribuídos às fertilizações realizadas nessa área em anos que precederam à montagem do experimento, pois esteve sob cultivo de bananeira irrigada por diversos anos, e esta cultura é comumente adubada com altas doses de fertilizante potássico na região, sem verificação dos teores existentes nos solos.

Por outro lado, a distribuição de Ca^{2+} e Mg^{2+} entre as camadas variou ao longo dos períodos experimentais, observando-se teores maiores na camada mais profunda avaliada (30-60 cm) aos 9 MAT, enquanto que aos 0 e 18 MAT essas concentrações mantiveram-se mais estáveis ao longo do perfil (Figura 3 C e D). O que foi verificado aos 9 MAT pode ter ocorrido em função da diluição e lixiviação de parte dos sais presentes com as chuvas verificadas antes dessa amostragem (Figura 1). Isso é comum ocorrer em solos sob degradação pela salinidade e sodicidade, em que a baixa capacidade de infiltração dificulta a retirada dos sais em camadas mais profundas, onde estes ficam concentrados após o período chuvoso.

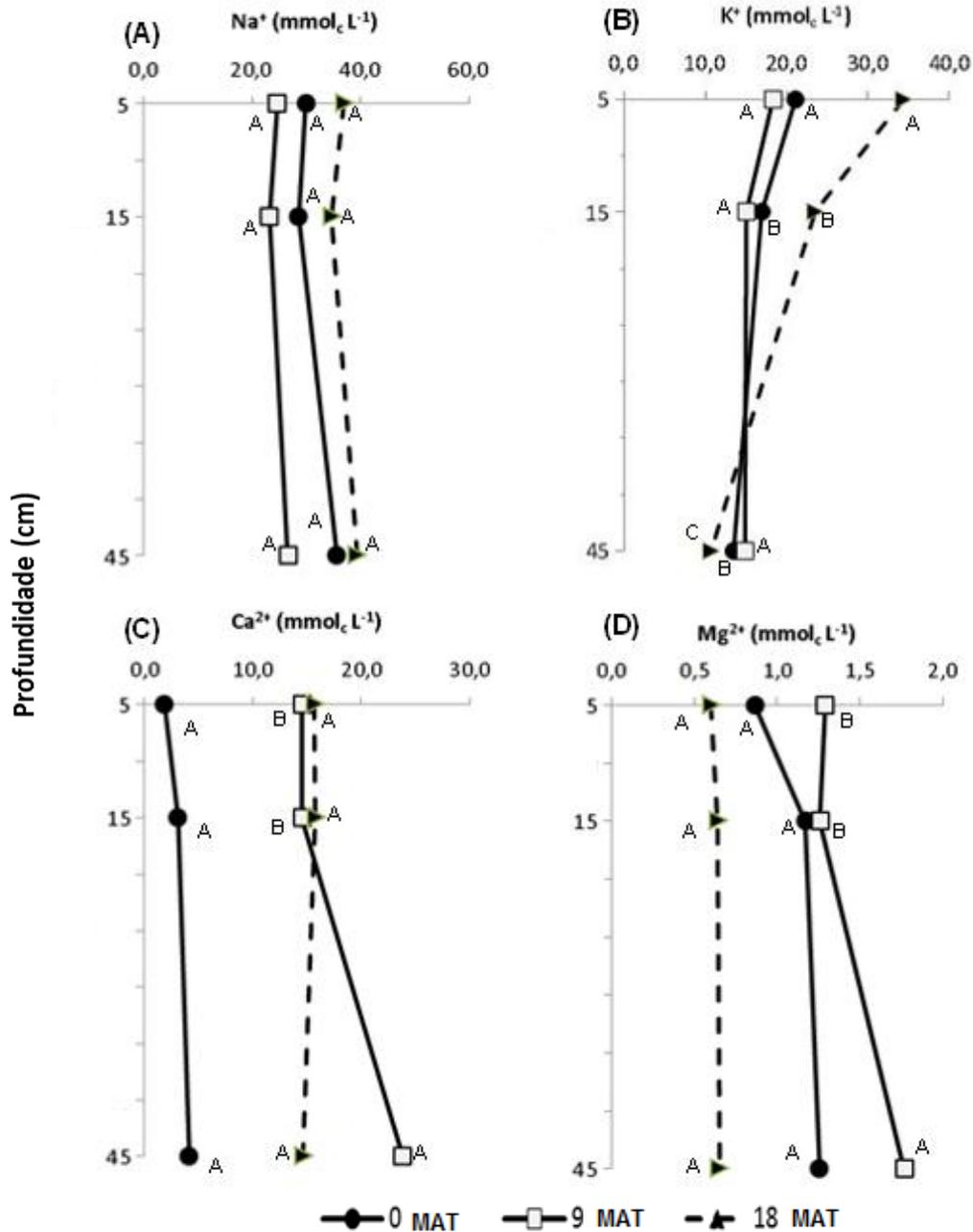


Figura 3. Teores dos cátions solúveis Na⁺ (A), K⁺ (B), Ca²⁺ (C) e Mg²⁺ (D), aos 0, 9 e 18 MAT, no solo das camadas 0-10, 10-30 e 30-60 cm. Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre as camadas do solo.

Contudo, neste caso, isso é positivo e indica que o solo está sendo recuperado, especialmente porque os teores de sódio solúvel foram diminuídos, mas os de cálcio foram elevados após os 18 meses de experimentação, da mesma forma como foi observado para estes cátions na

forma trocável. É importante que haja uma predominância dos elementos essenciais às plantas, facilitando a manutenção do equilíbrio nutricional das mesmas e, conseqüentemente, possam ser obtidas melhores produtividades.

Apesar de não ter sido observada diferença entre os teores de cloro com a profundidade (Figura 4), verificou-se que estes diminuíram após os 18 meses de experimentação em relação ao início do trabalho, o que também indica melhoria nas propriedades do solo com o cultivo das plantas. Como citado anteriormente, os valores mais baixos aos 9 MAT ocorreram pela diluição da solução do solo e lixiviação de parte dos sais, em consequência das chuvas verificadas nos meses anteriores.

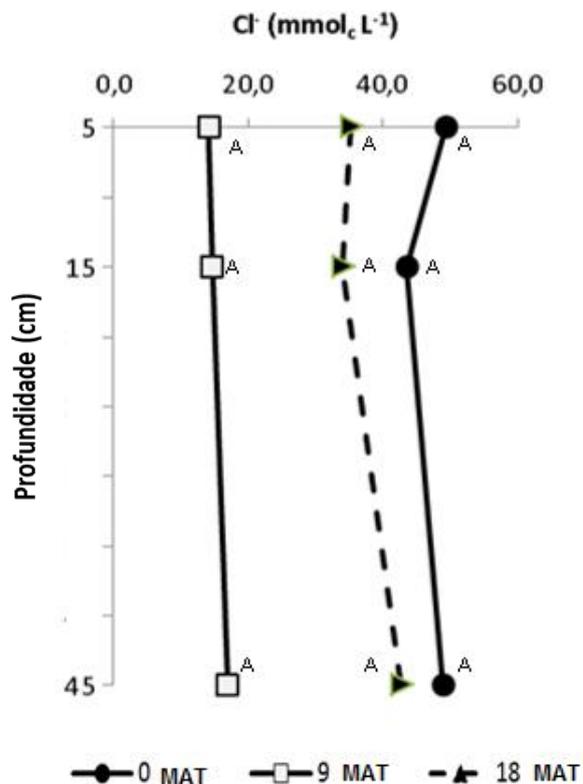


Figura 4. Teor de cloreto solúvel (Cl⁻) aos 0, 9 e 18 MAT no solo das camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm. Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre as camadas do solo.

4.2. Recuperação química do solo

Apesar de pouco tempo para um estudo de fitorremediação de solo em campo, ambiente aberto com entradas e saídas de sais, foram verificados resultados interessantes quando à diminuição da condutividade elétrica do solo

estudado em função do cultivo das plantas (Figura 5). As interações salinidade-planta-ambiente sob condições de campo promovem influências mútuas que delineiam curvas dinâmicas de sais ao longo do tempo e, muitas vezes, encobrem os efeitos dos tratamentos que estão sendo aplicados.

Além disso, os valores de precipitação incidentes na região durante o período experimental (Figura 1) podem ser considerados como um fator adicional, influenciando sobre as variações nos valores de CE observados. No início do experimento, época seca na região, as baixas precipitações observadas coincidiram com altas concentrações eletrolíticas.

Aos 9 MAT, a CE diminuiu consideravelmente, o que pode ser atribuído, em parte, à absorção de íons pelas plantas e também à lixiviação de sais, devido às elevadas precipitações verificadas antes dessa amostragem de solo. Já ao final do experimento, outro período seco, ocorreu um incremento da concentração de sais para alguns tratamentos, no entanto, todos os de cultivo de plantas foram efetivos em diminuir a CE do solo em comparação do controle, especialmente os de atriplex (Figura 5A).

O efeito dos tratamentos com o emprego das espécies estudadas sobre a concentração eletrolítica, representada pela CE, foi evidente. O cultivo das plantas promoveu reduções significativas nos valores de CE, com exceção do plantio de sabiá isoladamente ($P < 0,05$). A influência na redução da salinidade pelo tratamento Atriplex em cultivo isolado foi observada de forma mais acentuada, enquanto os demais tratamentos também diminuíram a CE, mas em menor escala (Figura 5A).

Aos 18 meses de cultivo das plantas, a maior percentagem de redução nos valores de CE foi registrada no tratamento de Atriplex isolada (82,8%) e o menor no tratamento Sabiá (1,99%). Já no controle foi observado incremento na concentração de eletrólitos em torno de 11,83% em relação ao início da fase experimental.

A eficácia do tratamento Atriplex destaca-se dos demais tratamentos empregados numa proporção de redução duas vezes maior em relação aos consórcios atriplex x leucena, atriplex x nim e atriplex x sabiá, apresentou-se três vezes mais efetivo do que os tratamentos leucena e nim, e quatro vezes relativamente ao sabiá.

Embora com resultados menos expressivos, a aplicação dos consórcios trouxe benefícios significativos quanto à redução da salinidade do solo, a qual

foi suficiente para o solo passar a ser classificado como não salino de acordo com a classificação proposta por USSL Staff (1954). A aplicação desse tipo de manejo pode ser indicada para remediação de solo salino e, paralelamente, oferece outra fonte alternativa de produção de biomassa, bem como, incrementa a diversidade de espécies vegetais no ambiente, sendo de maior significância ambiental. É possível, até, que outras associações de espécies possam promover maiores incrementos nos efeitos dos cultivos sobre a melhoria das propriedades de solos degradados pela salinidade.

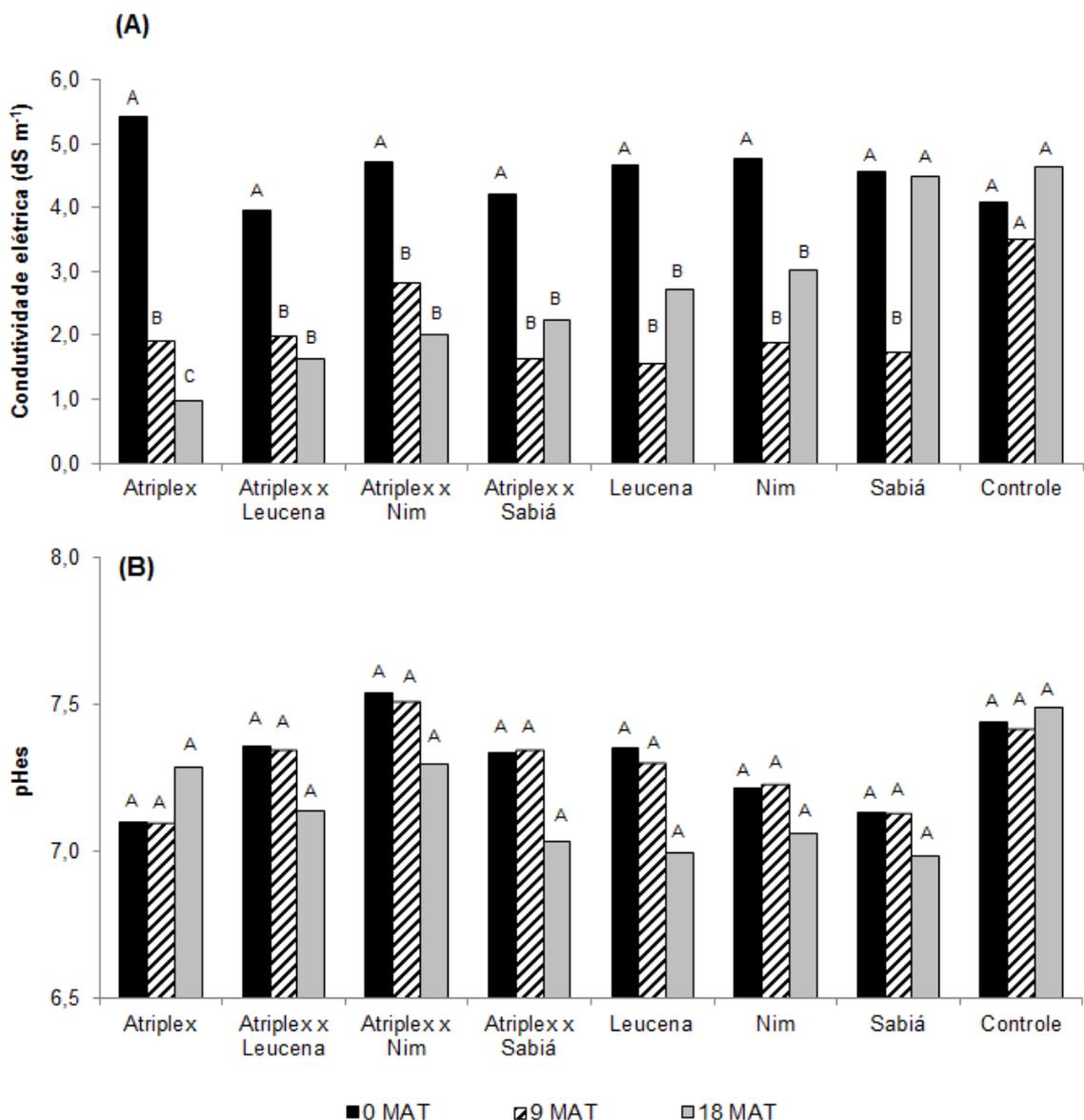


Figura 5. Condutividade elétrica (A) e pH do extrato de saturação (B) do solo em função do cultivo de atriplex, leucena, nim e sabiá, isoladas ou em consórcio, aos 0, 9 e 18 meses. Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre os tratamentos.

Estudando o efeito da biorremediação, Han et al. (2015) comprovaram a eficácia de halófitas sobre a salinidade do solo, sendo observadas reduções na concentrações de sais em torno de 26,5% para a espécie *Heliotropium curassavicum* e 71,4% para *Suaeda marítima*.

Ainda com relação à eficiência do uso de plantas em ambientes contaminados por sais, Gharaibeh et al. (2011), usando *Atriplex halimus*, confirmaram o potencial remediador do gênero atriplex, com a redução da condutividade elétrica do extrato de saturação de 65,3 dS m⁻¹ para 3,8 dS m⁻¹.

Uma estimativa adicional, feita por Azevedo et al. (2005) com base na diminuição das percentagens da CE para a espécie *A. nummularia*, em um experimento com um solo irrigado com água de rejeito de dessalinizador, com salinidade de 4 g L⁻¹ e água salobra de poço, com salinidade de 3 g L⁻¹, encontrou valores inferiores da salinidade do solo com o cultivo de plantas de atriplex.

O emprego de plantas fitoextratoras de sais também foi avaliado por Nasir (2009), que realizou um estudo de campo analisando a capacidade de recuperação de solo salino sódico com o emprego de três espécies halófitas acumuladoras de sais (*Tamarix aphylla*, *Atriplex nummularia* e *Atriplex halimus*) e observaram diminuição da salinidade do solo no final do período experimental.

Recentemente, Souza et al. (2012) enfatizaram o potencial da *Atriplex nummularia* Lindl. como halófito de alta capacidade de sobrevivência em ambientes com restrição hídrica e elevadas concentrações de sais. Os autores salientam que os padrões de desenvolvimento e alterações anatômicas exibidas pela referida espécie cultivada em diferentes condições de umidade do solo podem contribuir significativamente para uma gestão eficiente do solo e da água em regiões semiáridas.

A recuperação de solos pelo emprego de espécies vegetais vem sendo muito abordada na literatura com referência à eficácia da técnica, baixo custo, melhores incrementos na qualidade do solo em relação à aplicação de produtos químicos e segurança ambiental (Zahran & Abdel Wahid, 1982; Qadir et al., 1996; 2007; Gharaibeh et al., 2011; Shelef et al. 2012; Souza et al., 2014; Jesus et al., 2015). Estudos desse tipo podem ajudar no aumento da cobertura vegetal em áreas degradadas do semiárido do Brasil, especialmente em um

período de alerta para as questões de sustentabilidade, e em um ambiente tão susceptível à degradação.

No entanto, não houve efeito significativo dos tratamentos sobre o pH do extrato de saturação do solo (Figura 5B), embora tenha havido ligeiras variações ao longo do tempo. Os valores de pH mantiveram-se próximos às condições originais do solo até os nove meses, exceto no tratamento controle, onde não foram observadas expressivas variações no período experimental.

É possível que o período decorrido do transplântio até a última amostragem de solo não tenha sido suficiente para que fossem detectadas alterações nos valores de pH, variável mais estável nos solos, para a qual só se observam diferenças em períodos mais longos de tempo. Conforme Qadir et al. (2007) o mecanismo mais eficiente que as plantas têm em liberar, através do sistema radicular, H^+ e CO_2 ao solo, contribui para a dissolução da calcita, aumentando assim o teor de cálcio no solo, com conseqüente redução do pH. Talvez, em avaliações posteriores, essa influência pudesse ter sido mais efetiva sobre o pH do solo.

Por outro lado, a dinâmica de sais no sistema solo-água-plantas parece ter interagido diretamente com o potencial osmótico, pois os valores deste variaram em consonância com a salinidade (Figura 6). Ao início da fase experimental, o potencial osmótico (PO) foi similar, sem diferenças estatísticas entre os tratamentos ($P > 0,05$). Após 9 meses de experimento, período que seguiu às chuvas, houve uma diluição dos sais que refletiu nos resultados do PO. Aos 18 meses, no entanto, observada uma diferença significativa, com o tratamento controle destacando-se dos demais, chegando a uma diferença percentual em torno 80% em relação ao tratamento com Atriplex, o de resultados de potencial osmótico menos negativos (Figura 6).

Ben-Gal et al. (2009) consideram a ação da concentração eletrolítica fundamental sobre o potencial osmótico. E salientam que esta variável fornece perspectivas consideráveis quanto às respostas das plantas cultivadas em ambientes salinos, podendo influir de forma relevante no manejo agrícola desses ambientes.

Souza et. al. (2012) fazem referência à importância da medição do potencial osmótico em ambientes salinos, considerando-o como um dos principais potenciais de água no solo, estimulando, inclusive, o emprego do

potencial osmótico como uma ferramenta eficaz na avaliação da salinidade em condições de solo-água-planta.

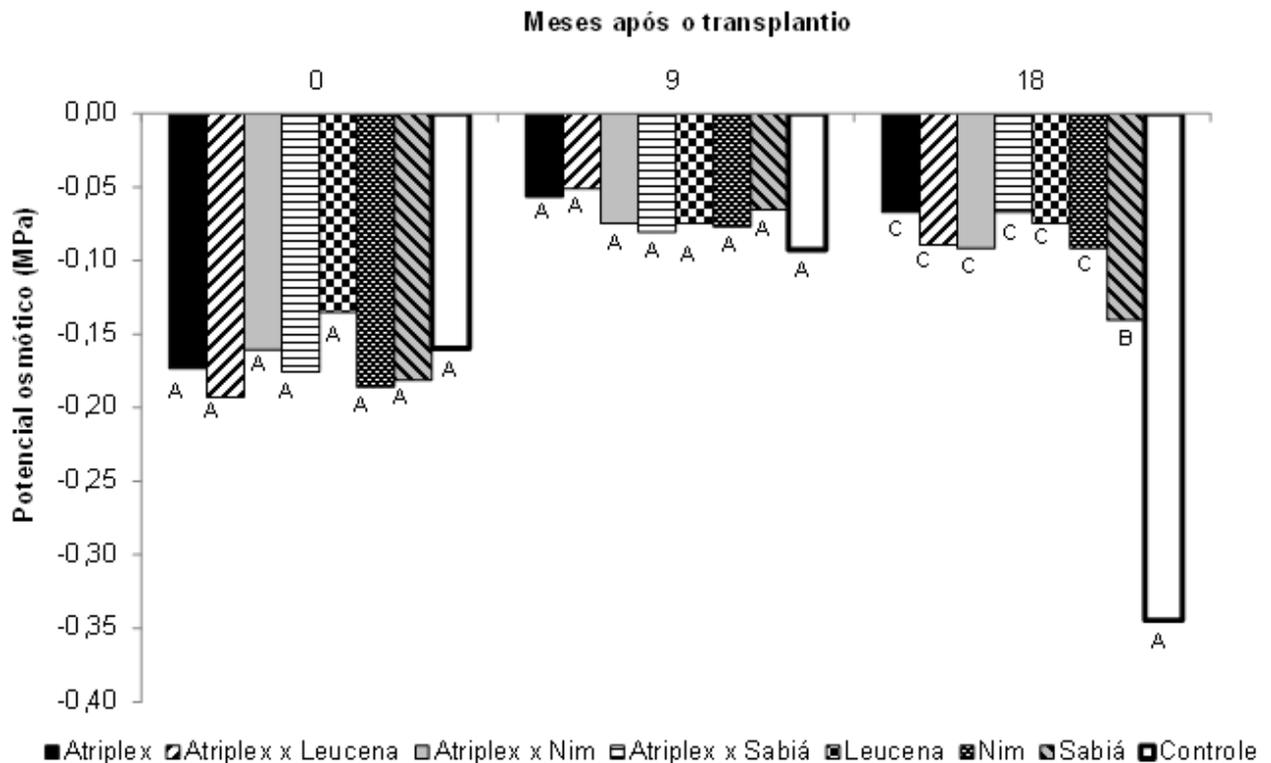


Figura 6. Potencial osmótico do solo em função do cultivo de atriplex, leucena, nim e sabiá, isoladas e em consórcio, e tratamento controle, aos 0; 9 e 18 meses. *Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre os tratamentos.*

Ao comparar os valores de potencial osmótico aos de condutividade elétrica, Souza et al. (2013) observaram um comportamento semelhante entre essas duas variáveis em soluções de cápsulas extratoras e o extrato de saturação.

Comprovando isso, houve uma relação linear entre o potencial osmótico do solo avaliado e a condutividade elétrica nas três épocas de avaliação do solo (Figura 7). Isso demonstra haver associação entre a concentração de íons na solução do solo e o potencial osmótico, sendo ambos considerados bons indicadores da salinidade do solo.

Elevadas concentrações de sais no solo refletem em altos valores de CE e potencial osmótico muito negativo, dificultando o estabelecimento da maioria das plantas no solo. Apenas aquelas que possuam mecanismos adaptativos ao

estresse salino podem sobreviver nessas condições, pois tem de manejar o potencial interno para que consigam absorver água contra estes baixos valores de potencial osmótico da solução do solo. Mesmo as que conseguem sobreviver sob estas condições, o fazem à custa de gasto energético, reduzindo sua produtividade, sendo importante selecionar espécies que tenham maior capacidade de tolerância aos altos teores de sais em solos, que possam revegetar áreas degradadas e sem cobertura vegetal.

Ao se avaliar CEes, pH e PO em função da profundidade do solo, verificou-se que a CEes diminuiu em camadas mais profundas, exceto aos nove meses (Figura 8A), enquanto para o potencial osmótico foi observado aumento significativo em profundidade apenas aos nove meses com diferença estatística ($P < 0,05$) (Figura 8C), mas o pHes foi pouco alterado, não havendo variação significativa ($P > 0,05$) entre as camadas avaliadas em nenhuma das avaliações do experimento (Figura 8B).

Representando graficamente os valores de condutividade elétrica e potencial osmótico entre as camadas de solo (Figura 8), observa-se comportamento indicativo de elevação dos níveis na concentração de sais na camada superior (0-10 cm) nas épocas mais secas (0 e 18 MAT), sendo diferente estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, evidenciando a influência ambiental sobre o balanço de sais no solo, que provavelmente, resultou na ascensão capilar de água do lençol freático, característica de regiões com altas taxas de evapotranspiração e baixos índices de precipitação pluvial, como a do presente estudo.

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

No entanto, efeito inverso foi observado no experimento aos 9 MAT, havendo tendência de aumento da condutividade elétrica e potencial osmótico em profundidade, é provável que a supressão dos teores de sais na camada superficial deva-se à lixiviação em decorrência do total de precipitações acumuladas observadas no período enfatizando a ação da chuva na lavagem

dos sais dos solos. Adicionalmente, a ação física das raízes nos tratamentos com cultivo influenciaram a estrutura do solo, refletindo em maior transmissividade de água no perfil do solo, com conseqüente estímulo à lixiviação de sais.

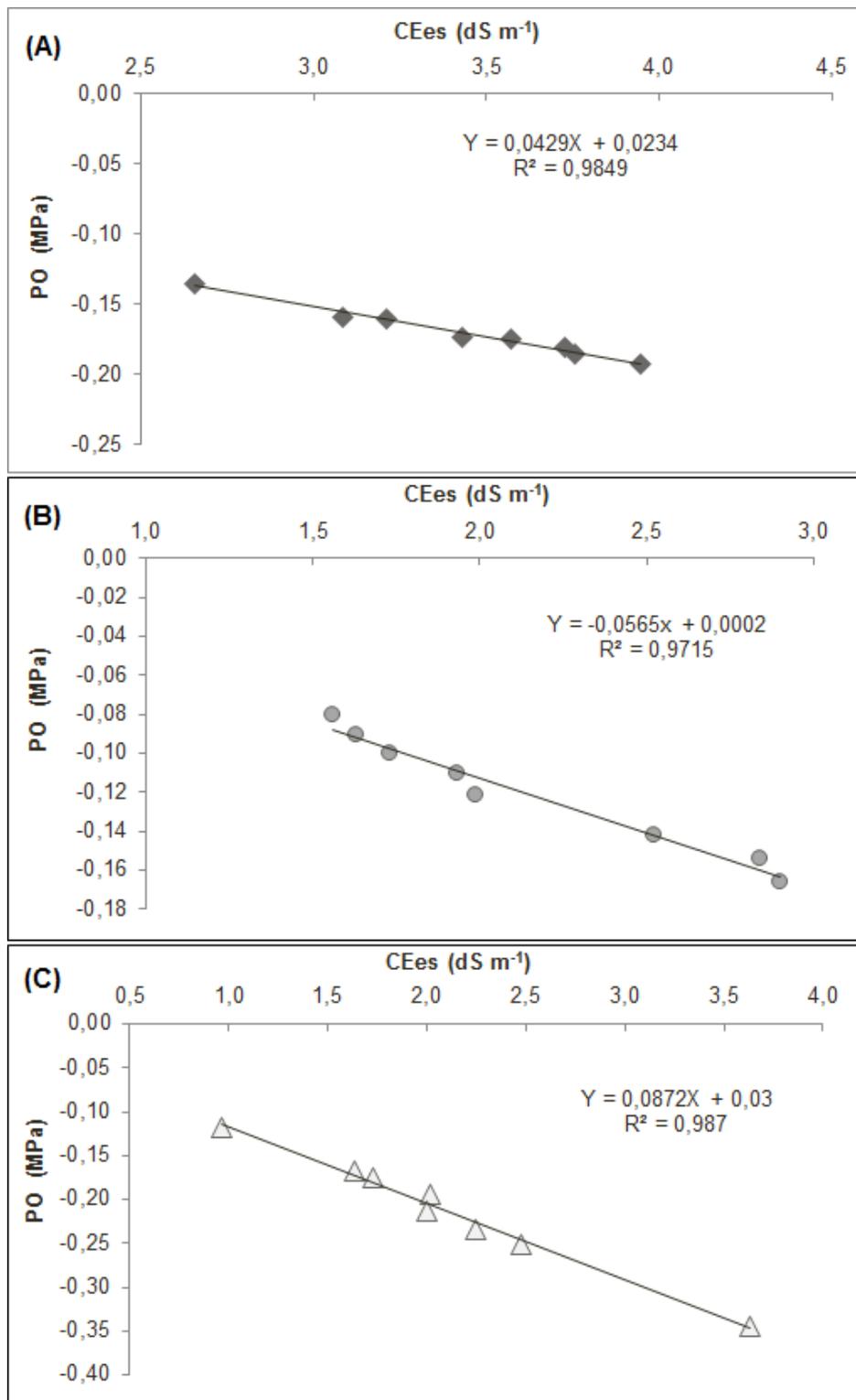


Figura 7. Relação entre o potencial osmótico e a condutividade elétrica em solo salino aos 0 (A); 9 (B) e 18 (C) meses do experimento.

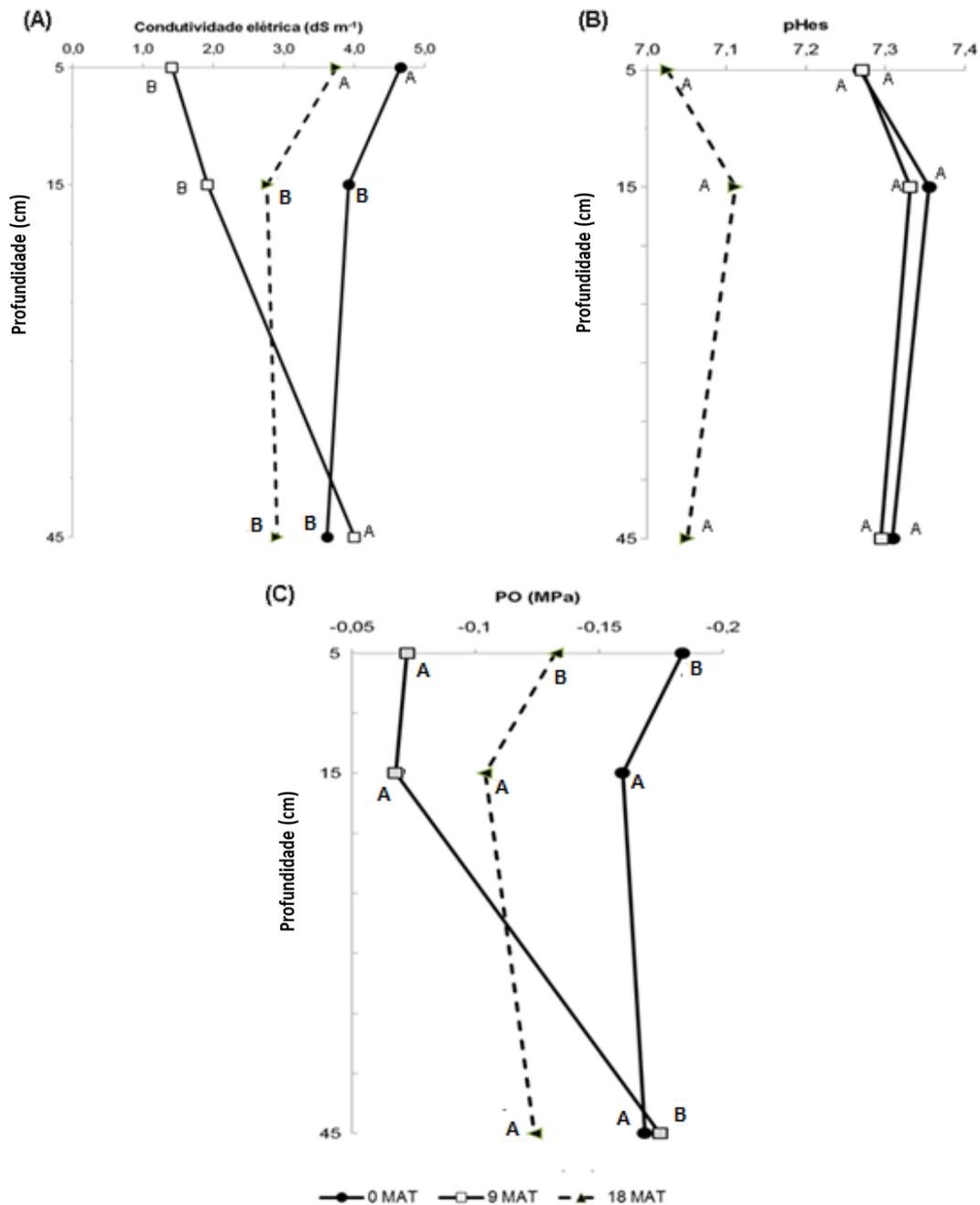


Figura 8. Condutividade elétrica (A), pH do extrato de saturação (B) e potencial osmótico do solo (C) em função da profundidade, nas camadas 0-10; 10-30 e 30-60 cm. Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre as camadas de solo.

Ao se avaliar os valores médios da condutividade elétrica e do potencial osmótico em todos os tratamentos e profundidades a cada época de avaliação cada amostragem de solo é possível considerar a existência de uma relação diretamente proporcional entre as taxas de sais no solo e os índices pluviométricos (Figura 1). Mas, sabendo-se que estes eventos de elevada precipitação são fenômenos que não se repetem com frequência, e verificando-

se que as concentrações de sais observadas ao final do experimento no tratamento controle equivalem-se àquelas encontradas às condições originais da área, justifica-se mais ainda a necessidade de manutenção das plantas em campo por períodos longos para que a diminuição dos teores de sais seja realmente efetiva.

Quanto à sodicidade do solo, foram avaliadas a PST e a RAS em função dos tratamentos e nas três épocas de amostragem (Figura 9A e 9B). Todos os tratamentos de cultivo de plantas reduziram significativamente a PST em comparação com o tratamento controle, sendo o tratamento da atriplex isolada o mais eficiente e o da leucena o de menor eficiência.

Na amostragem inicial (0 MAT) não foram verificadas diferenças estatísticas entre os solos dos tratamentos, e reduções significativas nos valores de PST foram observadas já na avaliação subsequente (9 MAT), podendo isso ser associado aos efeitos das precipitações ocorridas na época, pois não houve efeito dos tratamentos. No entanto, ao final do experimento (18 MAT), as diferenças foram significativas ($P < 0,05$), com reduções nos valores de PST promovidas pelo cultivo das plantas das espécies testadas (Figura 9A).

A maior redução (65,65%) foi obtida com o cultivo isolado da atriplex, com decréscimo da PST 28,21 para 9,69%, o que promoveu a alteração da classificação do solo de sódico para não sódico, segundo USSL Staff (1954). Os tratamentos em que houve consórcio das espécies também promoveram reduções consideráveis, na faixa de 38,31% (atriplex x leucena); 37,84% (atriplex x nim) e 32,00% (atriplex x sabiá), o que mais uma vez reforça o efeito positivo desse tipo de manejo.

Já nos tratamentos leucena, nim e sabiá, antes da correção, o solo apresentava uma percentagem de sódio trocável de 26,10%; 37,84% e 38,84%, respectivamente. Aos 18 MAT os respectivos valores médios passaram para 23,27%; 27,72%, 25,10%, o que corresponde a uma redução na PST de 10,84%; 26,75% e 30,36%.

A diminuição da PST promovida pelos tratamentos pode ser atribuída à suplementação de Ca^{2+} na solução do solo, proveniente, pela provável dissolução de calcita influenciada pelas raízes das plantas, com consequente substituição de Na^+ no complexo de troca e a absorção do sódio pela parte aérea das plantas (Han et al., 2015). Gharaibeh et al. (2011) relatam resultados semelhantes e efetivos de melhoria de solo altamente salino-sódico, com

redução na percentagem de sódio trocável com o cultivo de *Atriplex halimus* de 27,4 para 9,1%.

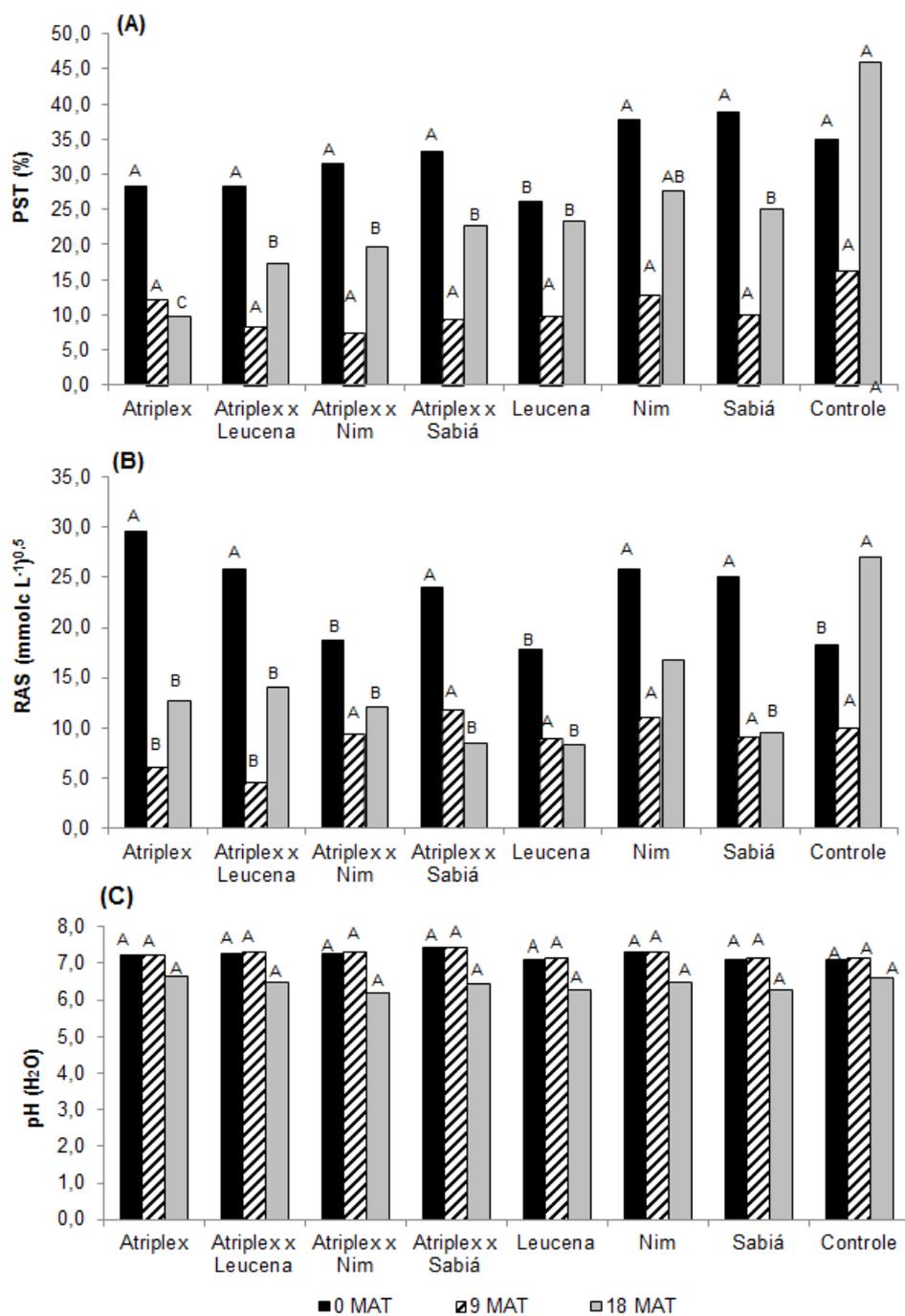


Figura 9. Percentagem de sódio trocável (A), relação de adsorção de sódio (B) e pH do solo (C) em função do cultivo de atriplex, leucena, nim e sabiá, isoladas e em consórcio, e tratamento controle, aos 0; 9 e 18 meses. Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre os tratamentos.

Além da redução na PST verificada, destaca-se que houve aumento desta no controle (Figura 9A), confirmando a importância do cultivo de plantas nessas áreas em degradação, por evitar o aumento da sodicidade, tanto no tamanho da área degradada quanto no nível da degradação.

Quanto à RAS, variável que expressa a sodicidade na fase solúvel, os resultados seguiram o mesmo encontrado para a PST, com o uso da atriplex em cultivo isolado sobressaindo-se em relação às plantas consorciadas e as outras espécies estudadas (Figura 9B). Essas alterações tem impacto muito positivo, uma vez que indicam a proporção do Na^+ solúvel em relação aos cátions solúveis bivalentes Ca^{2+} e Mg^{2+} , relação esta que promove alterações na fase trocável, pelo equilíbrio entre os elementos trocáveis e os da solução do solo, o que é importante para fertilidade do solo.

O efeito dos tratamentos começou a ser observado aos 9 MAT, no entanto, ao final do experimento (18 MAT) as diferenças foram mais evidentes entre os tratamentos de biorremediação e o controle (Figura 9B). Essa diferença pode ser atribuída aos menores teores de sódio apresentados no período, resultante da absorção do elemento pelas plantas, aliada ao incremento de Ca^{2+} e Mg^{2+} solúveis, deixando a solução do solo com maior proporção desses íons em relação aos outros períodos.

O efeito da fitorremediação foi relatado por Rabhi et al. (2008) que, trabalhando com mudas de três espécies vegetais *Arthrocnemum indicum*, *Suaeda fruticosa* e *Sesuvium portulacastrum* cultivadas por 170 dias em um solo salino, observaram significativas reduções na RAS do solo, atribuindo esse efeito à absorção de sais solúveis, principalmente íons de sódio, com o acúmulo expressivo de sódio verificado em *Sesuvium portulacastrum* que chegou a um teor de 30% na parte aérea.

Apesar das alterações verificadas na PST e na RAS, a reação do solo manteve-se estável ao longo dos dezoito meses experimentais, não sendo observado efeito significativo entre os tratamentos e as camadas do solo ($P > 0,05$), com valores de pH alcalinos até os nove meses e ligeiramente ácidos ao final do experimento (Figura 9C). Comportamento que pode ser reflexo das concentrações e tipo de íons presentes no solo estudado.

A diminuição no pH do solo, analisada em valores absolutos, se justifica pelo deslocamento de bases trocáveis para camadas mais profundas, possibilitando a ocupação de parte dos sítios de troca por hidrogênio

proveniente da dissociação iônica da água; carbonatos e parte dos bicarbonatos, responsáveis pela alcalinidade, formam complexos de baixa solubilidade com o cálcio, e o próprio aumento da concentração de eletrólitos na solução do solo pode contribuir para o abaixamento do pH.

Na distribuição da PST e RAS entre as camadas do solo, não houve diferença estatística pelo teste de Tukey ao nível de 5% ($P > 0,05$) embora tenha sido observada uma ligeira superioridade nas camadas de 0-10 cm e de 30-60cm em relação a de 10-30 (Figura 10A e 10B). É provável que as alterações nos elementos trocáveis em profundidade tenham ocorrido similarmente em todas as camadas avaliadas, uma vez que foram cultivadas espécies arbóreo/arbustivas, com sistema radicular profundo e a profundidade de amostragem chegou apenas a 60 cm.

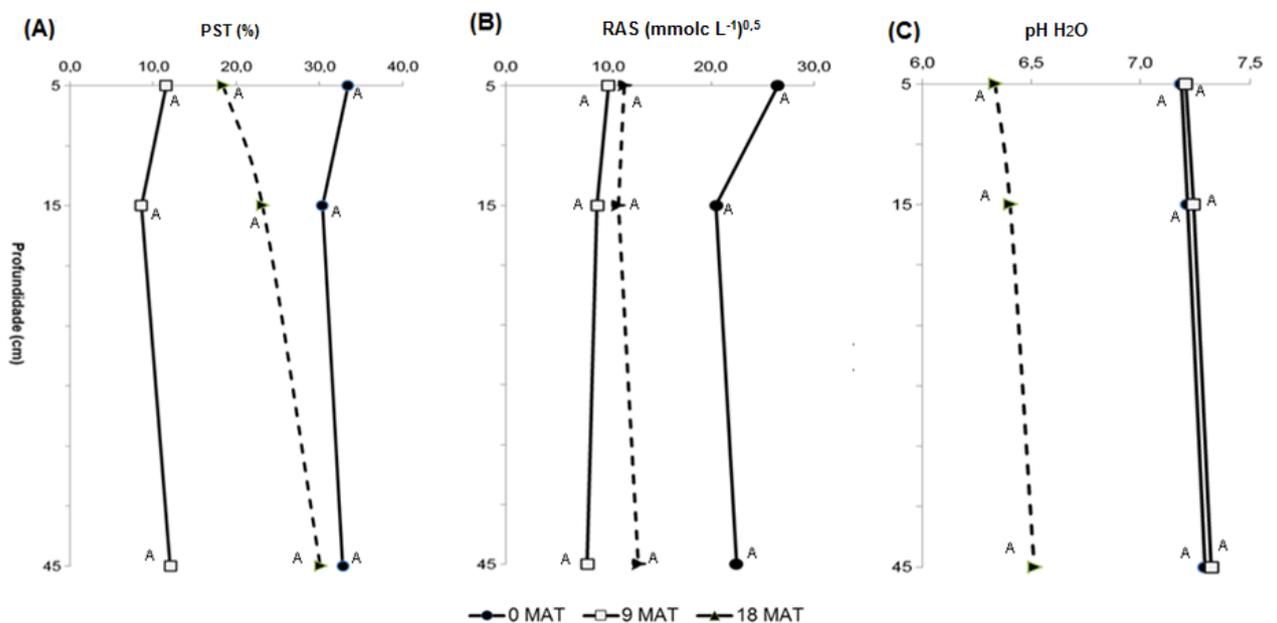


Figura 10. Percentagem de sódio trocável (A), relação de adsorção de sódio (B) e pH do solo (C) em função da profundidade, nas camadas 0-10; 10-30 e 30-60 cm, aos 0, 9 e 18 MAT. Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre as camadas do solo.

O emprego de espécies vegetais na recuperação de solos salinos também foi considerado por Akhter et al. (2003), e observaram que a salinidade e a sodicidade do solo diminuíram exponencialmente com o desenvolvimento no solo da espécie *Leptochloa fusca* (L.), e atribuíram que a presença da planta

ainda contribuiu para a lixiviação de sais a partir da superfície (0-20 cm) até as camadas mais profundas (> 100 cm).

O mesmo ocorreu para o pH, sem diferença entre as camadas estudadas (Figura 10C). No entanto, verificou-se uma redução dos valores de pH na terceira amostragem de solo, sendo um resultado positivo, uma vez que valores muito elevados de pH podem promover a indisponibilidade de alguns nutrientes, comum em solos afetados por sais.

4.3. Recuperação física do solo

O sucesso da fitorremediação não está associado exclusivamente à melhoria dos atributos químicos do solo, mas também à garantia da qualidade física do mesmo. É uma técnica que deve exercer influência sobre a estrutura do solo; portanto, o emprego de plantas que atuam nesse sentido pode caracterizar uma estratégia fundamentada na qualidade e sustentabilidade ambiental.

Durante o período de avaliação do experimento, em geral, o cultivo das plantas influenciou significativamente as propriedades físicas do solo avaliadas, em comparação ao controle. A densidade do solo foi reduzida após os 18 meses do experimento, especialmente nos tratamentos de cultivos de plantas. A menor densidade do solo foi observada nas parcelas cultivadas com a associação de atriplex e nim ($1,44 \text{ Mg m}^{-3}$) e do nim cultivado isoladamente ($1,45 \text{ Mg m}^{-3}$) e a maior Ds no tratamento controle ($1,53 \text{ Mg m}^{-3}$). Em geral, a Ds foi significativamente mais elevada no tratamento controle nas três camadas de solo avaliadas (Tabela 6).

Do ponto de vista físico, o uso de plantas que contribuem para a melhoria da estrutura do solo, como técnica de manejo, propicia a formação de bioporos com ampla variação de tamanho. Esses bioporos funcionam como rotas alternativas para o crescimento das raízes e aumentam o movimento de água e a difusão de gases no solo (Lima et al., 2012; Arévalo-Gardini et al., 2015).

Wohlenberg et al. (2004) afirmam existir uma relação mútua entre as condições físicas do solo e o desenvolvimento vegetal. Dessa forma, a qualidade da estrutura influi no crescimento de raízes, que promove o crescimento vegetal. Por sua vez, as plantas, pela ação do sistema radicular e parte aérea, exercem significativo benefício na agregação, pois as raízes finas

que se ramificam pelo solo predispõem à formação de agregados. Além disso, removem continuamente a água, criando secamento nas regiões próximas a elas e, pela exsudação, fornecem substrato alimentar para microrganismos da rizosfera que, direta ou indiretamente, influenciam na agregação. Nesse contexto, contribuem na recuperação de solos degradados, sendo algumas espécies mais eficientes do que outras.

Tabela 6. Densidade do solo (Ds), porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo em função do cultivo de plantas de atriplex, leucena, nim e sabiá, isoladas e em consórcio, aos 0 e 18 meses, nas camadas 0-10, 10-30 e 30-60 cm

Tratamento	Ds ¹	Ds ²	Porosidade					
	Mg m ⁻³		Total ¹	Total ²	Micro ¹	Micro ²	Macro ¹	Macro ²
cm ³ cm ⁻³								
<u>0-5 cm</u>								
Atriplex	1,57 a	1,51 b	0,45 b	0,59 a	0,27 a	0,21 b	0,18 b	0,38 a
Atriplex x Leucena	1,58 a	1,44 b	0,61 a	0,65 a	0,41 a	0,18 b	0,20 b	0,46 a
Atriplex x Nim	1,60 a	1,45 b	0,53 b	0,62 a	0,34 a	0,20 b	0,19 b	0,42 a
Atriplex x Sabiá	1,54 a	1,45 b	0,53 b	0,57 a	0,35 a	0,32 a	0,17 b	0,25 a
Leucena	1,57 a	1,51 b	0,42 b	0,53 a	0,21 a	0,23 a	0,22 b	0,31 a
Nim	1,58 a	1,45 b	0,44 b	0,64 a	0,27 a	0,21 b	0,16 b	0,43 a
Sabiá	1,57 a	1,49 b	0,51 b	0,62 a	0,35 a	0,11 b	0,16 b	0,51 a
Controle	1,54 a	1,54 a	0,49 a	0,50 a	0,30 a	0,29 a	0,21 a	0,21 a
<u>15-20 cm</u>								
Atriplex 1	1,54 a	1,48 b	0,59 a	0,50 b	0,29 a	0,11 b	0,19 b	0,39 a
Atriplex x Leucena 3	1,53 a	1,48 b	0,59 a	0,58 a	0,51 a	0,41 b	0,08 b	0,16 a
Atriplex x Nim 2	1,56 a	1,45 b	0,44 b	0,67 a	0,28 a	0,21 a	0,16 b	0,46 a
Atriplex x Sabiá 4	1,53 a	1,45 b	0,58 b	0,66 a	0,37 a	0,18 b	0,21 b	0,49 a
Leucena 5	1,55 a	1,53 a	0,47 b	0,53 a	0,39 a	0,31 a	0,08 b	0,23 a
Nim 6	1,57 a	1,45 b	0,42 b	0,68 a	0,21 a	0,11 b	0,21 b	0,57 a
Sabiá 7	1,57 a	1,51 b	0,59 b	0,69 a	0,50 a	0,49 a	0,10 a	0,19 a
Controle 8	1,53 a	1,53 a	0,50 a	0,49 a	0,36 a	0,34 a	0,14 a	0,15 a
<u>40-45 cm</u>								
Atriplex	1,52 a	1,50 a	0,59 a	0,54 a	0,53 a	0,42 b	0,07 b	0,12 a
Atriplex x Leucena	1,52 a	1,52 a	0,67 a	0,60 b	0,54 a	0,31 b	0,14 b	0,28 a
Atriplex x Nim	1,54 a	1,46 b	0,45 b	0,69 a	0,20 a	0,17 a	0,25 b	0,51 a
Atriplex x Sabiá	1,51 a	1,51 a	0,62 a	0,65 a	0,41 a	0,40 a	0,21 a	0,25 a
Leucena	1,53 a	1,48 b	0,59 a	0,60 a	0,45 a	0,41 a	0,14 b	0,19 a
Nim	1,56 a	1,46 b	0,43 b	0,54 a	0,22 b	0,37 a	0,21 a	0,17 a
Sabiá	1,55 a	1,51 b	0,60 a	0,64 a	0,44 a	0,39 a	0,16 b	0,25 a
Controle	1,51 a	1,52 a	0,62 a	0,56 a	0,34 a	0,46 a	0,29 a	0,08 b

Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre os tempos de cultivo. ¹ Início do experimento (0 MAT); ² Final do experimento (18 MAT).

Uma hipótese do estudo era que haveria redução da densidade do solo com o cultivo das espécies vegetais, o que foi constatado de forma

significativa, sobretudo nas camadas mais superficiais. É importante considerar que a avaliação da densidade foi realizada após 18 meses do cultivo das espécies estudadas, período que pode ser considerado curto para recuperar a qualidade física deste solo. Avaliações mais prolongadas poderiam fornecer informações mais efetivas sobre os reais benefícios do cultivo de plantas neste tipo de solo degradado.

A variação na densidade do solo é evidente na camada superficial (0-10 cm), enquanto que na camada mais profunda do solo (30 - 60 cm), ela tende a ser a mesma, exceto nos tratamentos com o nim (atripex x nim, e Nim), onde foram observadas maiores reduções na Ds em todas as camadas avaliadas, o que pode ser atribuído ao comportamento do seu sistema radicular agressivo, cuja raiz pivotante atinge maiores profundidades (Mossini & Kemmelmeier, 2005). Semelhantemente, Lima et al. (2012) constataram valores inferiores de densidade do solo nas camadas superficiais em função do cultivo de capins do gênero *Cynodon*, considerando que tal processo de melhoria está associado à morte e renovação do sistema radicular, à atividade microbiana no solo e a ciclagem de nutrientes.

Menor densidade na camada superficial também foi observada por Reinert et al. (2008) em Argissolo Vermelho distrófico típico, e atribuíram o fenômeno à maior densidade de raízes das culturas utilizadas e ao maior teor de matéria orgânica. Além disso, ponderaram o efeito dos ciclos de umedecimento e secagem, que resultam do processo mais intenso de evaporação devido à demanda atmosférica e também da maior absorção de água pelas raízes das plantas.

Sistemas de produção que conservam o solo beneficiam o acúmulo de matéria orgânica, tal fato pode ter contribuído consideravelmente para promover a qualidade estrutural do solo. Essas variações nas propriedades físicas do solo observadas com o cultivo das plantas podem ser atribuídas a uma baixa perturbação, aliada ao estímulo da atividade microbiana que, por sua vez, atua como um agente melhorador da estabilidade dos agregados; além disso, os compostos orgânicos são menos densos, o que leva à diminuição da densidade do solo na superfície, onde há maior acúmulo de matéria orgânica (Lima et al, 2012).

Os valores de densidade do solo ao final do experimento foram inversamente relacionados com a porosidade total do solo (Tabela 6). Valores

mais elevados de D_s resultaram em menores proporções de poros no solo, o que foi observado no tratamento controle. Assim como a redução na densidade do solo e aumento na porosidade podem ter efeito positivo sobre o desenvolvimento das raízes, especialmente em plantações de árvores, pois, paralelamente à diminuição da densidade e elevação da porosidade, ocorre a supressão da resistência desse solo e, como consequência, a aeração aumenta, levando a efeitos favoráveis sobre o crescimento das raízes.

A melhoria da qualidade física do solo pode ser constatada pelo aumento da macroporosidade e porosidade total (Tabela 6). A evolução estrutural é constatada pelo aumento percentual da porosidade total entre 6 e 31% e aumento médio da macroporosidade de 17 a 69%, nos tratamentos com plantas, enquanto no tratamento controle não foi observada alteração. Essas diferenças são devidas ao crescimento radicular, que promove uma quantidade maior de bioporos, nos quais ocorrem às trocas gasosas e o fluxo descendente de água.

A alta afinidade entre a macroporosidade e a condutividade hidráulica do solo saturado estabelece uma interferência, principalmente porque a densidade de fluxo que passa por um poro é proporcional à quarta potência de seu diâmetro (Reichert et al., 2007).

Desta forma, sugere-se que a presença de bioporos resultante da exploração do solo pelas raízes das plantas, possibilitou melhoria nos atributos físico-hídricos do solo, constatada pelo aumento na condutividade hidráulica do solo em meio saturado (K_{sat}) com o tempo (Figura 11).

O cultivo das plantas na área promoveu alterações significativas na K_{sat} , especialmente quando em consórcio, aumentando a K_{sat} do solo em comparação ao controle, sem cultivo de plantas, sugerindo a influência positiva da presença destas na melhoria da qualidade física do solo sob degradação.

Os maiores valores de K_{sat} foram observados nos tratamentos com plantas consorciadas, superando o valor do tratamento controle em até três vezes (atriplex x leucena e atriplex x nim) e duas vezes (atriplex x sabiá). Os tratamentos em sistemas de cultivo isolado modificaram um pouco menos a K_{sat} , mas ainda assim promoveram incrementos significativos em relação ao estado original do solo com diferenças significativas ($p < 0,05$). Isso indica que o uso de espécies em associação pode ser mais efetivo na melhoria da qualidade do solo, possivelmente pelas diferenças em profundidade e extensão

do sistema radicular, ciclagem de nutrientes, produção de exsudatos radiculares que estimulam a atividade biológica, associações com microrganismos, etc.

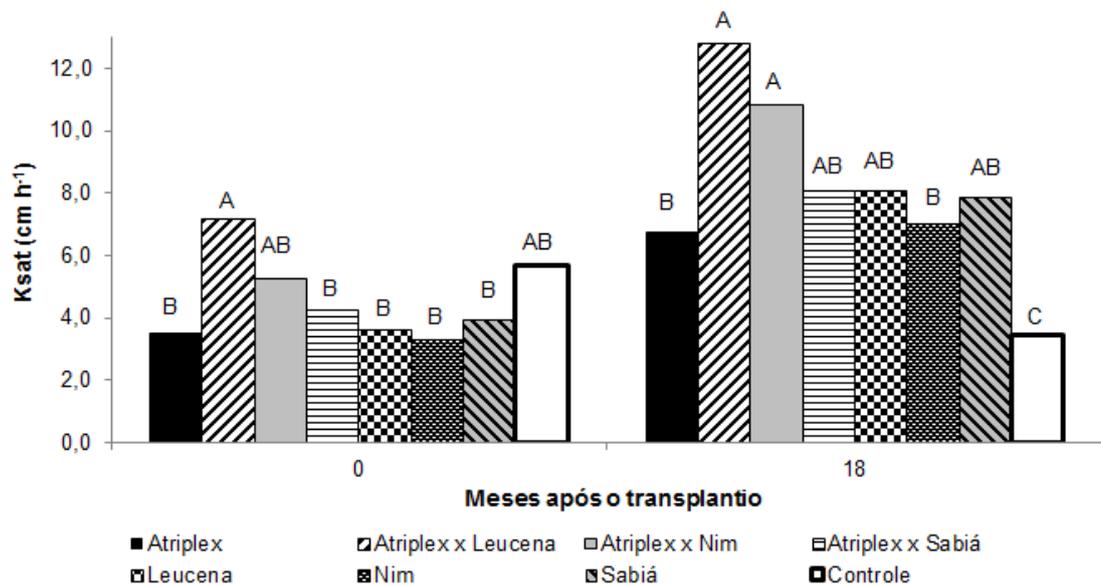


Figura 11. Condutividade hidráulica do solo em meio saturado (Ksat) em função do cultivo de atriplex, leucena, nim e sabiá, isoladas ou em consórcio, aos 0 e 18 meses. Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre os tratamentos.

Por outro lado, a Ksat diminuiu com a profundidade do solo (Figura 12). Ao início e final do experimento, os valores de Ksat na camada de 0-10 cm foram superiores em relação às camadas subsuperficiais do solo, diferenciando-se estatisticamente ($p < 0,05$), refletindo a elevada porosidade total e macroporosidade notados nesta profundidade do solo (Tabela 6).

Isso também é comum em solos salinos e sódicos, pois a dispersão dos coloides facilita a movimentação de partículas finas no perfil do solo, concentrando-se em camadas mais profundas, o que pode ser comprovado pelo aumento dos teores de argila e silte em profundidade neste solo, acompanhado pela diminuição nos teores de areia (Tabela 3). Isso promove a obstrução de poros, formação de camadas adensadas, que dificultam a movimentação de ar e água em solos afetados por sais, sendo de importância fundamental no processo de degradação.

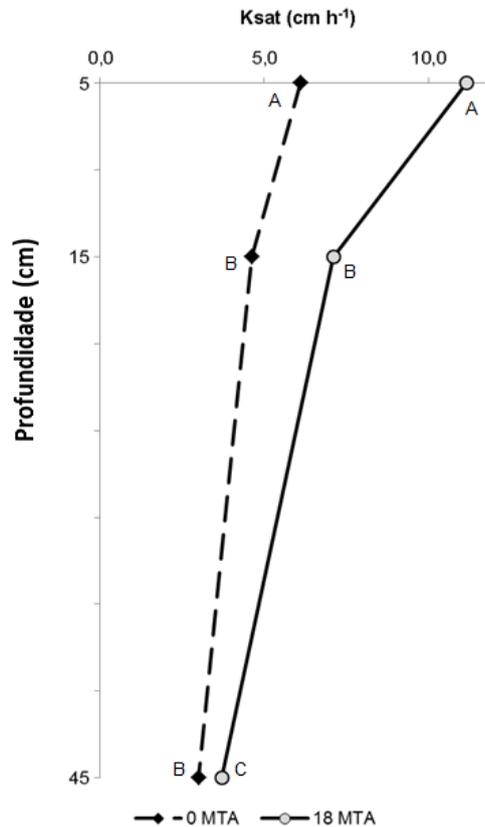


Figura 12. Condutividade hidráulica do solo em meio saturado (K_{sat}), em função da profundidade, aos 0 e 18 meses do experimento. *Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre as camadas do solo.*

Também pode ser consequência da maior densidade de raízes em superfície, pelo estabelecimento das plantas no solo, causando alteração na estrutura original do solo especialmente onde há maior desenvolvimento radicular, igualmente como foi relacionado para a densidade do solo e porosidade.

Além dos motivos já discutidos, a influência do teor de areia total no comportamento da resistência hidráulica do solo, pode se configurar como explicação para tais diferenças, que está associada ao aumento da macroporosidade, favorecendo a permeabilidade do solo, uma vez que a concentração de macroporos nessa camada foi superior ao limite crítico de macroporos estabelecido na literatura (Klein, 2008). Quando a porosidade de aeração é menor que 10%, a taxa de fluxo de oxigênio em direção ao sistema radicular das plantas é severamente prejudicada afetando, assim, os processos fisiológicos/metabólicos e, conseqüentemente, o crescimento das raízes das plantas (Stefanoski et al., 2013).

Na camada mais profunda (30-60 cm), os valores de Ksat foram ainda mais baixos, com resultados próximos aos observados na amostragem inicial do solo. Isso pode ter ocorrido pela pouca interferência das raízes das plantas nessa camada de solo, bem como pelo pouco tempo decorrido para que fossem percebidas grandes alterações nas propriedades físicas deste solo, especialmente em profundidade. É possível que isso venha a ser verificado com a manutenção das plantas em campo.

Como as demais variáveis, a argila dispersa em água (ADA) também foi alterada em função do cultivo das plantas, com diferenças significativas entre a ADA do solo sob cultivo e o solo no tratamento controle ($p < 0,05$) aos 18 MAT (Figura 13).

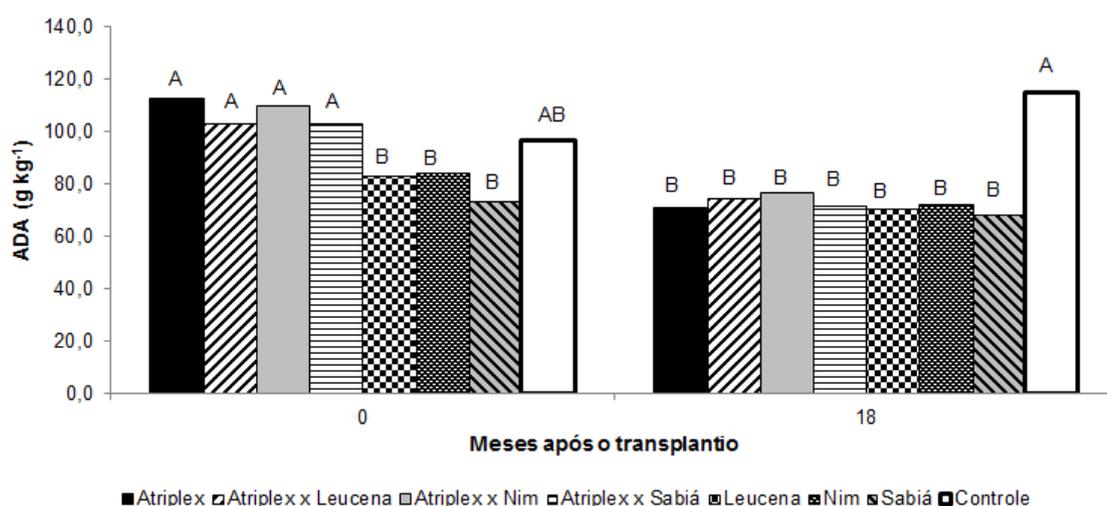


Figura 13. Argila dispersa em água (ADA), em função do cultivo de plantas de atriplex, leucena, nim e sabiá, isoladas e em consórcio, e tratamento controle, aos 0 e 18 meses. Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre os tratamentos.

Na avaliação aos 18 MAT, verificou-se que o a ADA no solo do tratamento controle foi maior que nos tratamentos sob cultivo das plantas, o que refletiu no maior índice de dispersão do solo do controle em relação aos outros tratamentos (Figura 14). O cultivo das plantas, isoladamente ou em consórcio, promoveu redução nos valores da ADA, com destaque para o tratamento de atriplex em cultivo isolado, com decréscimo de $41,73 \text{ g kg}^{-1}$ de ADA, enquanto no controle foi observado o contrário, acréscimo de $18,33 \text{ g kg}^{-1}$ em relação ao início do experimento.

A maior dispersividade observada no solo do tratamento controle e menor nos tratamentos com cultivo das espécies se justifica pelo tipo de cátion presente em maior concentração no complexo de troca do solo. O solo teve saturação do complexo de troca com sódio alta no controle (Tabela 4), que variou entre os tratamentos similarmente ao índice de dispersão (Figura 14). O sódio, por ser um cátion monovalente e de extenso raio hidratado, promove aumento na espessura da dupla camada difusa dos coloides do solo, promovendo a manutenção dessas partículas mais afastadas umas das outras e, por consequência, causando maior dispersão do solo em meio líquido. Isso facilita a movimentação dos coloides no perfil do solo, causando a formação de camadas adensadas em profundidades, o que também foi verificado nesse estudo.

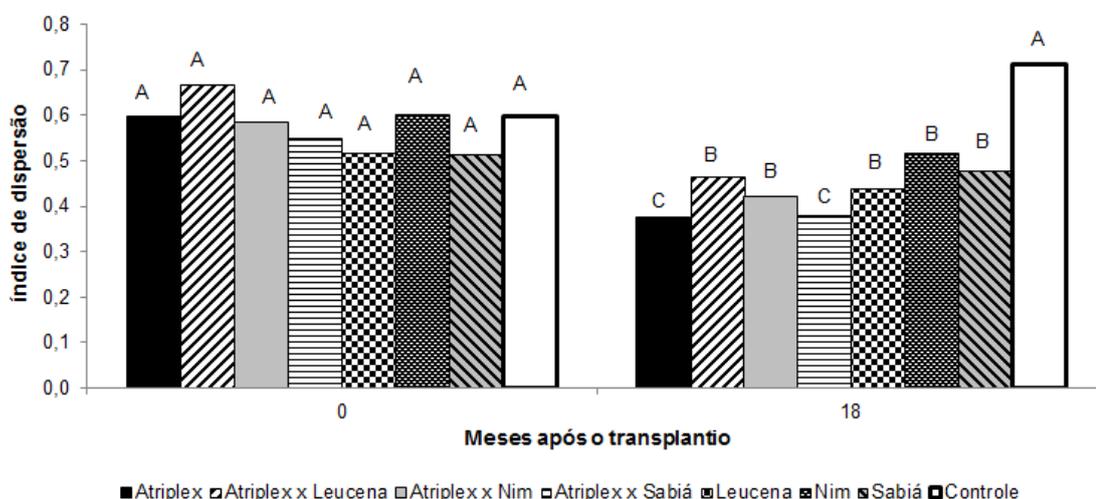


Figura 14. Índices de dispersão, em função do cultivo de plantas de atriplex, leucena, nim e sabiá, isoladas e em consórcio, e do tratamento controle, aos 0 e 18 meses de experimento. Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre os tratamentos.

Por outro lado, o aumento nos teores de cálcio verificado no solo sob o cultivo das plantas (Tabela 4) promoveu melhoria no equilíbrio químico do complexo coloidal, conduzindo ao incremento na floculação dos coloides, desta forma, haveria menor predisposição ao fenômeno de dispersão (Figura 14). Sob menor teor de cálcio e maior de sódio, o solo do tratamento controle também foi o que teve maior valor de ADA e de índice de dispersão (Figuras 13 e 14).

A influência do sódio nos processos de dispersão neste solo também pôde ser confirmada com o aumento da ADA, especialmente em subsuperfície (30-60 cm) (Figura 15), camada esta com os maiores teores de sódio trocável (Figura 2A). A presença do sódio trocável deve ter contribuído para o deslocamento de coloides e sua concentração em camadas subsuperficiais deste solo. Além disso, a tendência crescente da dispersividade do solo acompanha o comportamento dos teores de argila total em profundidade (Tabela 3).

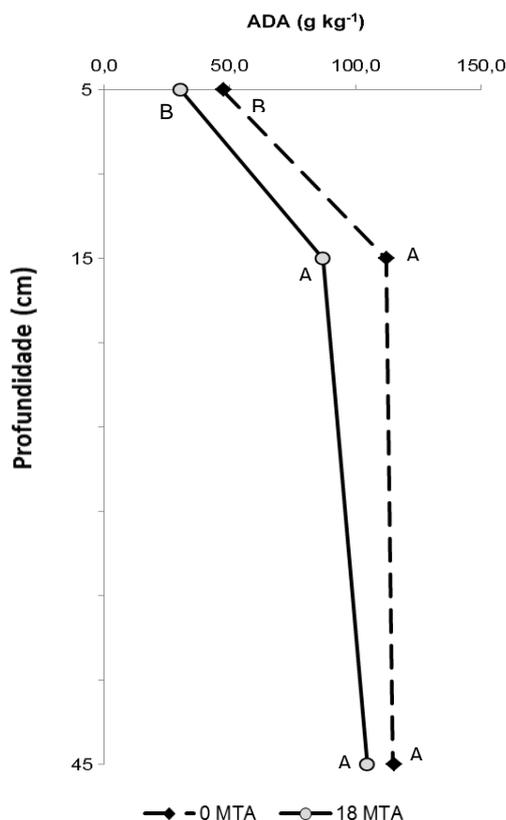


Figura 15. Teores de argila dispersa em água (ADA), em função da profundidade, aos 0 e 18 meses do experimento. *Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre as camadas de solo.*

Os resultados observados entre o início da fase experimental e o final, permitem influir que as propriedades físicas do solo avaliadas no presente estudo foram influenciadas pelo cultivo das plantas das espécies utilizadas de maneira positiva. Essas plantas, por sua vez, parecem ser capazes de se desenvolver nesse ambiente sob salinidade e sodicidade, podendo ser

recomendadas na melhoria da qualidade de solos afetados por sais e, possivelmente, em sua recuperação.

4.4. Crescimento da planta

A altura das plantas de atriplex e área da copa tiveram comportamentos similares, sendo observados maiores valores médios no tratamento com atriplex em cultivo isolado em relação aos manejos consorciados ($P < 0,05$) (Figuras 16 e 17), possivelmente, pela competição entre as espécies.

No entanto, as plantas se desenvolveram bem, independentemente salinidade do solo na área (Figura 5A). As taxas de crescimento ascenderam em torno de 60% a cada seis meses, confirmando a habilidade da espécie *Atriplex nummularia* Lindl de habitar em ambientes com excesso de sais e deficiência hídrica, possibilitando a revegetação de áreas degradadas pela salinidade.

O crescimento das plantas é uma variável de fundamental importância e assume diferentes comportamentos de acordo com fatores diversos. Ambientes salinos impõem limitações ao metabolismo vegetal por meio da ação de agentes que interagem entre si, como a disponibilidade de nutrientes, umidade do solo e outros estresses abióticos, o que torna muito complexa, em condições de campo, a avaliação das respostas das plantas.

Embora a abordagem acerca do estresse salino em plantas foque predominantemente na toxicidade promovida pelo Na^+ e Cl^- , segundo Flowers et al. (2015), outros fatores podem contribuir para as reduções no crescimento. Estes incluem a baixa concentração citoplasmática de K^+ ; possível deficiência de Ca^{2+} em plantas glicófitas ou deficiência de Mg^{2+} , no caso de halófitas; efeitos adversos sobre as relações hídricas e diminuição da condutância estomática, limitando a fotossíntese líquida; possíveis desequilíbrios hormonais; danos causados pelas espécies reativas de oxigênio, além de desvio energético para realização do transporte de íons e/ou síntese de solutos compatíveis.

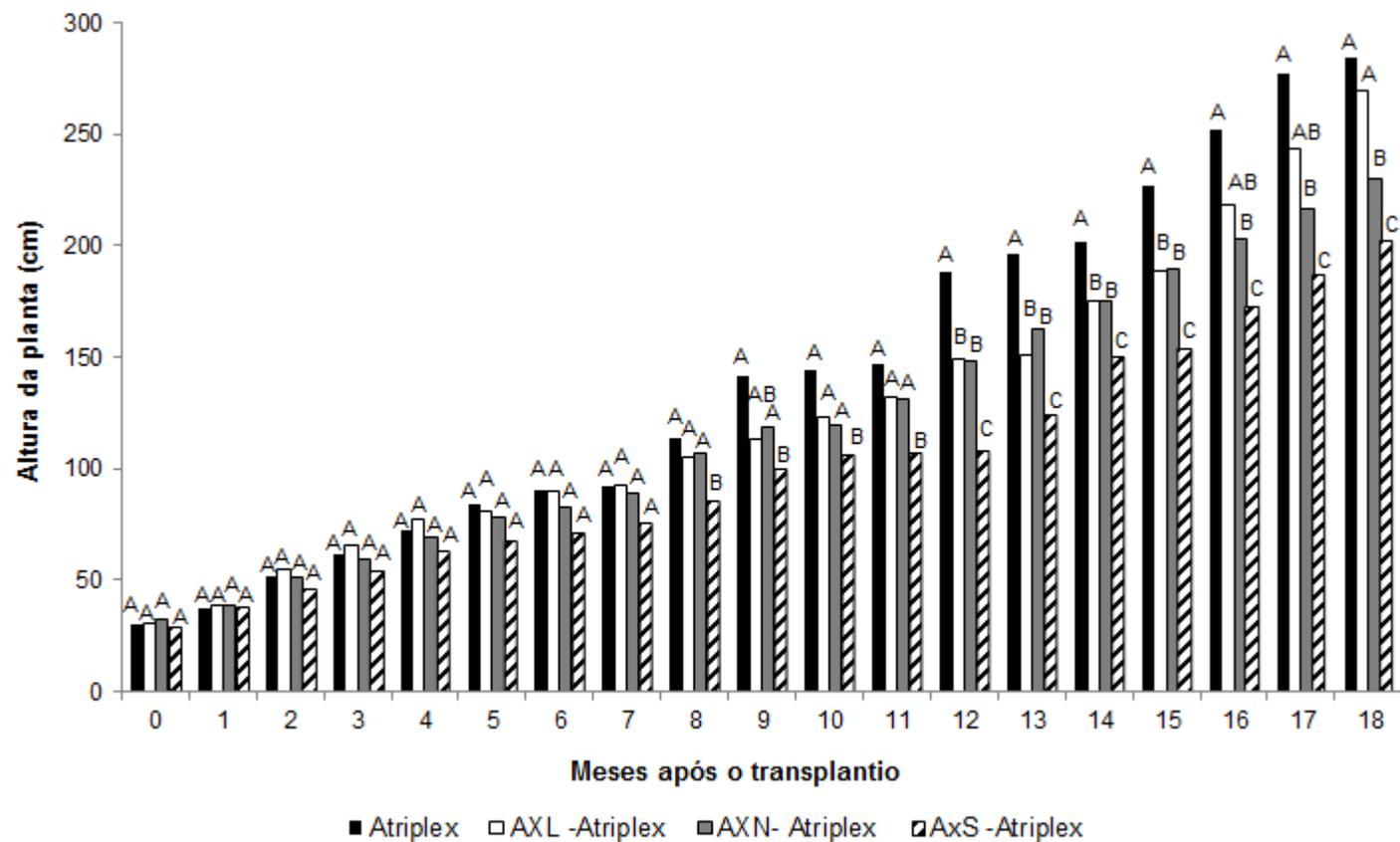


Figura 16. Altura de plantas de atriplex (cm) em cultivo isolado e em consórcio com leucena, nim e sabiá, em função do tempo após o transplântio (meses). Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre os tratamentos dentro de cada tempo de avaliação.

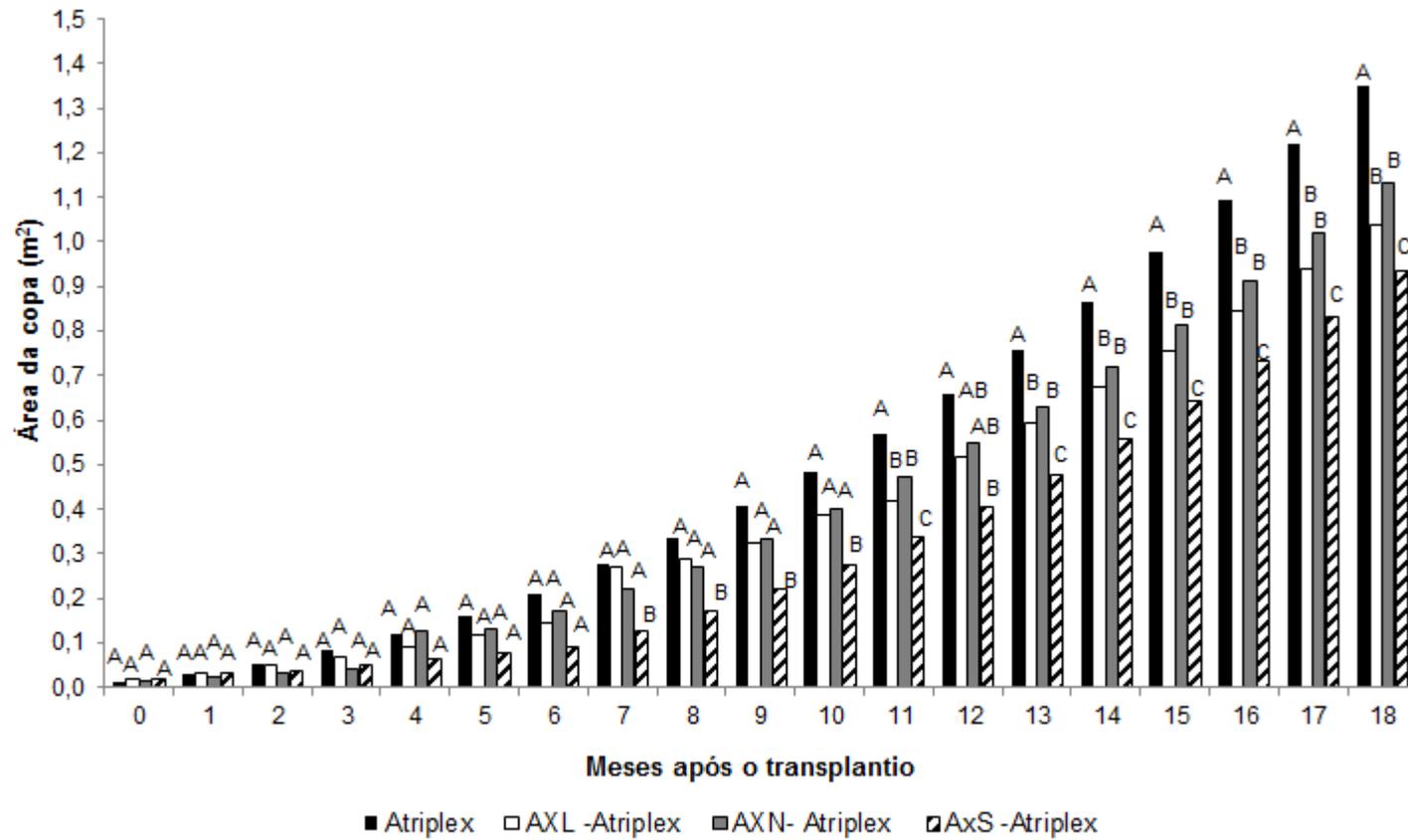


Figura 17. Área da copa de plantas de atriplex (m²) em cultivo isolado e em consórcio com leucena, nim e sabiá, em função do tempo após o transplântio (meses). Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre os tratamentos dentro de cada tempo de avaliação.

Paralelamente, o estresse salino tem efeito sobre o crescimento das plantas reduzindo o potencial de água no solo, levando ao estresse osmótico (Tavakkoli et al., 2011). Nesse sentido, a salinidade torna-se especialmente problemática, devido à energia adicional requerida pelas plantas para absorver água do solo (Munns, 2002; Ben Gal et al., 2009; Flowers et al., 2010). No entanto, as respostas também variam de acordo com as características da própria planta, da intensidade e tempo de exposição ao estresse.

Melo et al. (2016), trabalhando com a *Atriplex*, observaram que o crescimento das plantas foi inversamente proporcional ao aumento do nível de salinidade, esses autores verificaram que a altura das plantas diminuiu em torno de 20% no mais alto valor de CE (40 dS m^{-1}) em relação às plantas mantidas no tratamento controle (CE = 0 dS m^{-1}).

Entretanto, Santos (2012), cultivando plantas de *Atriplex nummularia* em solo altamente salino (CE = 70 dS m^{-1}) sob regime de podas, verificou crescimento progressivo das plantas em campo, independentemente da fase de desenvolvimento da cultura. Com acréscimo em altura nos seis primeiros meses após o transplante de 95,39 e 134,75% nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m, respectivamente.

A capacidade de plantas do gênero *Atriplex* em manter um bom desenvolvimento em ambientes salinos também foi comprovada por Glenn et al. (2012), em uma pesquisa com *Atriplex lentiformis*, *Atriplex hortensis* e *Atriplex canescens*, observando que o crescimento das plantas não foi comprometido pelas concentrações de sais na água de rega, que chegaram ao nível final de 85 g L^{-1} de NaCl. Krishnapillai & Ranjan (2005) constataram crescimento linear da *Atriplex patula* em um solo com condutividade elétrica de (48 dS m^{-1}), e atribuíram o fato a sua tolerância a elevados teores de sais.

É comum espécies halófitas tolerarem concentrações citoplasmáticas de Na^+ e Cl^- entre 100-200 mM (Flowers et al., 2015), conseguindo completar seu ciclo de vida em ambientes com concentrações salinas iguais ou superiores a 200 mM (Flowers & Colmer, 2008).

Portanto, os níveis salinos apresentados no presente estudo, que em média corresponderam a 40 mM, não impuseram condições de estresse nas plantas de *Atriplex*. O que mostra a capacidade de sobrevivência desta espécie em ambientes salinos, podendo ser empregada em programas de recuperação de solos degradados por sais.

Nas plantas de *Leucena* também foi observado um crescimento em altura ao longo do tempo de avaliação, tanto isoladamente quanto em consórcio (Figura 18A). O acréscimo em altura nos seis primeiros meses após o transplante (MAT) foi de 58 e 61%, nos cultivos consorciado e isolado, respectivamente, chegando a uma altura média de 3,90 m (consórcio com *Atriplex*) e 4,05 m (*Leucena* isolada) ao final do experimento.

O desenvolvimento observado no estudo mostra a apropriação do emprego de plantas de *leucena* em programas de remediação de solos salinos. Fato que também pôde ser comprovado por Silva (2008), que ao estudar o crescimento de *leucena* em campo, verificou que plantas aos 18 meses de idade apresentavam altura média de 4 metros.

Também houve diferença ($P < 0,05$) para a área da copa das plantas de *leucena*, com maior projeção da copa nas plantas manejadas em associação com a *atriplex* em comparação àquelas em cultivo individualizado (Figura 19A).

A literatura sobre os aspectos de crescimento do *nim* em solos afetados por sais é restrita, sabe-se que, em geral, seu porte pode variar de 15 a 20 m de altura e o diâmetro da copa varia de 8 a 12 m, podendo atingir 15 m em árvores isoladas (Brasil, 2013).

No presente estudo, foi observada diferença significativa de altura de planta ($P < 0,05$) a partir dos 8 meses de cultivo em campo, com as plantas no cultivo consorciado com altura média superior às plantas em cultivo isolado, e esta diferença manteve-se até os doze meses do experimento. Entretanto, nos últimos seis meses de cultivo, não houve diferença significativa na taxa de crescimento entre os dois cultivos de *nim* (Figura 18B). Isso pode indicar seu desenvolvimento adequado, aproximando-se da média para plantas desta espécie, seja em sistema de cultivo isolado ou em consórcio com a *atriplex*.

Por outro lado, a área da copa diferiu estatisticamente nos últimos seis meses, com a maior diferença observada aos 18 MAT, onde o tratamento de cultivo isolado foi 18% superior ao consorciado (Figura 19B). Holanda et al., (2007), estudando o crescimento inicial de espécies arbóreas em solo salino-sódico tratado com corretivos, verificaram que, entre as espécies estudadas, o *nim* foi a que atingiu maior altura, com tolerância à salinidade, quando cultivada em solo salino de CE igual a $2,08 \text{ dS m}^{-1}$.

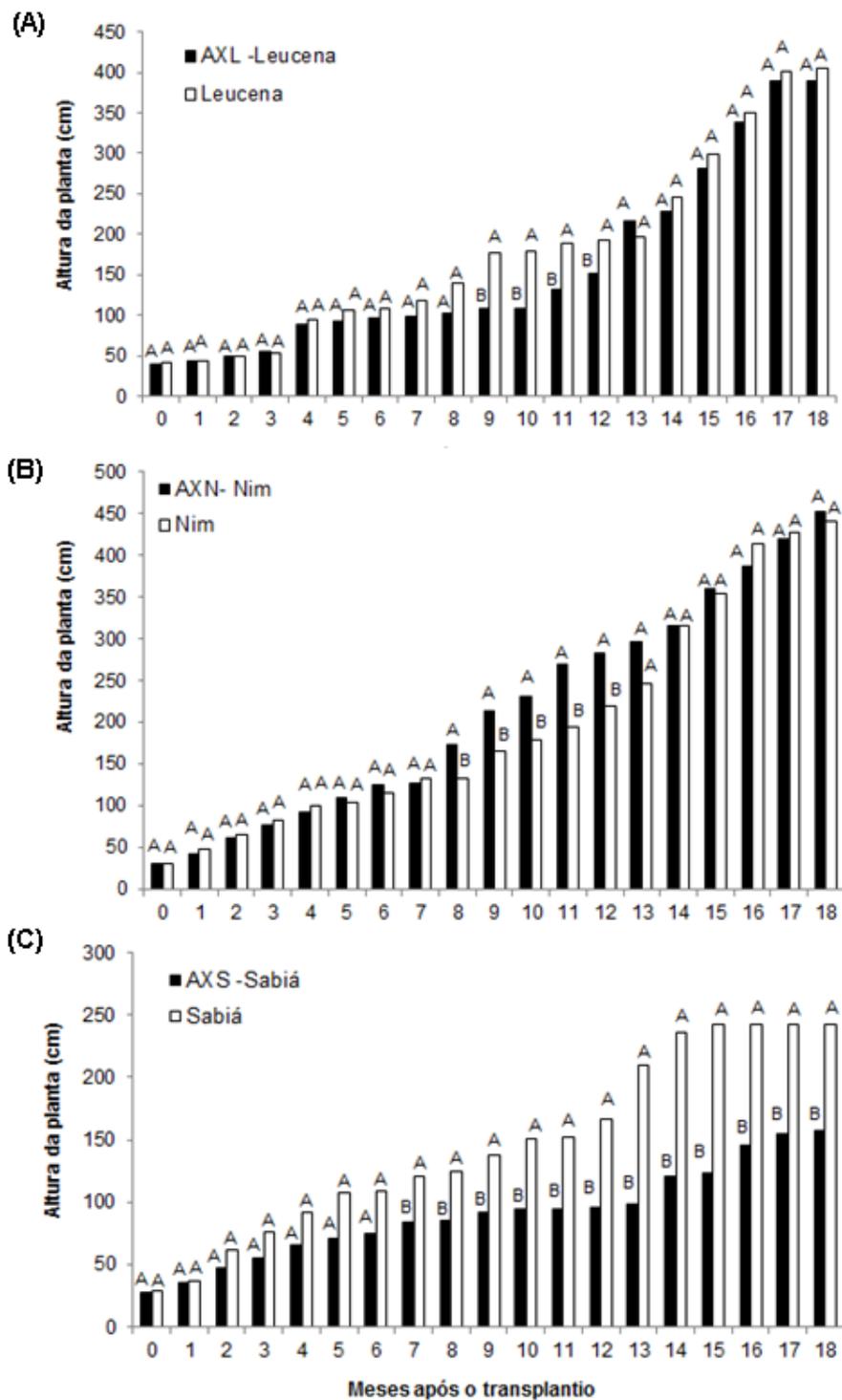


Figura 18. Altura de plantas de leucena (A), nim (B) e sabiá (C), em cultivo isolado e em consórcio com atriplex, em função do tempo após o transplântio (meses). Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre os tratamentos e dentro de cada tempo de avaliação.

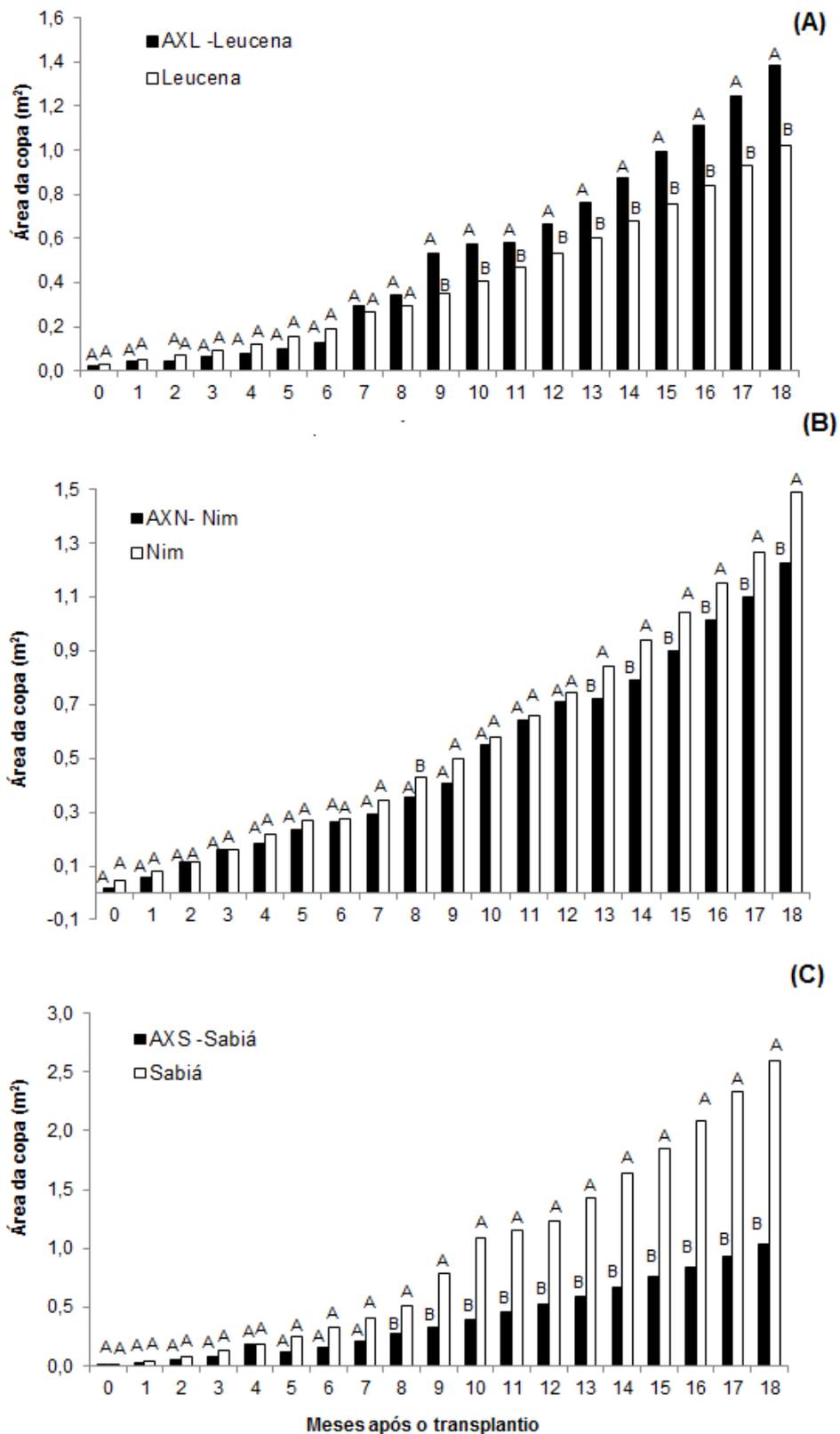


Figura 19. Área da copa de plantas de leucena, nim e sabiá (m²), em cultivo isolado e em associação com atriplex, em função do tempo após o transplântio (meses). Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey, entre os tratamentos e dentro de cada tempo de avaliação.

Contrariamente, as plantas de sabiá tiveram um crescimento menor do que o esperado, com 2,50 m quando cultivadas isoladamente e 1,50 m no consórcio aos 18 MAT (Figura 18C). Padrão de crescimento inferior ao encontrado por Carvalho et al. (2007), que caracteriza a planta como de crescimento rápido e sugere que a mesma atinge 4 m de altura em um período semelhante ao do presente estudo. Adicionalmente, a tendência de menor crescimento ao longo do tempo, no tratamento em associação com a atriplex, sugere que neste manejo, o adensamento foi demasiado e acabou gerando competição entre as plantas, o que acarretou no menor crescimento em altura (Figura 18C), comportamento semelhante foi observado nos valores da variável área da copa, com o tratamento sabiá em cultivo isolado destacando-se em relação ao consorciado (Figura 19C).

Avaliando padrões de resposta entre espaçamento e crescimento de espécies arbóreas, inclusive o sabiá, Leles et al. (2011) encontraram valores superiores ao do presente estudo, com médias de altura em torno de 3,50 m, em plantas com 1,5 ano de idade e manejadas no espaçamento 2,0 x 2,0 m. Os mesmos autores sugerem que espécies características do estágio inicial de sucessão (pioneiras) apresentam tendência de maior crescimento em altura em espaçamentos de plantio mais amplos.

A influência do estresse salino também foi estudada por Silva et al. (2009), que trabalhando com plantas de sabiá submetidas a concentrações salinas crescentes, concluíram que a taxa de crescimento relativo das plantas é influenciada pelo tempo de exposição ao estresse e com o aumento dos níveis de salinidade da água de irrigação, sendo apresentados reduções em torno de 26,30% no nível de 6 dS m⁻¹, em relação ao tratamento controle.

Da mesma forma, Santos & Tertuliano (1998) verificaram desenvolvimento tardio e lento das plântulas de sabiá, com valor máximo de altura de 4,6 cm obtido com o cultivado da espécie após 60 dias em solo salino-sódico com condutividade elétrica de 8 dS m⁻¹.

A influência da salinidade no desenvolvimento das plantas de sabiá ocorreu, possivelmente, em virtude da concentração de sais na solução do solo em torno das raízes e do acúmulo de íons potencialmente tóxicos (Na⁺ e Cl⁻) nos tecidos foliares; como consequência, a planta deve ter exercido um controle maior na abertura dos estômatos para evitar perda de água por transpiração. Por outro lado, a inibição do crescimento também pode ter

ocorrido pelo baixo potencial osmótico do solo (Figura 6), dificultando a absorção de água pelas plantas e a capacidade fotossintética em razão de fatores, como desidratação das membranas celulares, toxicidade por sais e redução do suprimento de CO₂ (Willadino & Câmara, 2005; Souza et al., 2011).

A contribuição da toxicidade por Cl⁻ para os efeitos do estresse salino observado no experimento atual apoia o argumento de que altas concentrações de Cl⁻ podem constituir importante limitação ao crescimento e rendimento das plantas (Dang et al., 2010).

Além disso, a manutenção das concentrações de K⁺ é considerada um mecanismo de importância para tolerância à salinidade e, conseqüentemente, garantia do crescimento da planta. Foi observada neste estudo uma redução significativa de K⁺ na planta paralelamente ao aumento de Na⁺. Como o Na⁺ não pode substituir todas as funções do K⁺, necessário para a síntese de proteínas, é provável que as alterações no crescimento em plantas de sabiá estejam relacionadas às alterações na absorção de K⁺ pelas raízes.

Na *Atriplex nummularia*, as altas concentrações de sódio e cloreto em seu tecido (Figura 20) são mantidas por meio da compartimentalização intracelular e a síntese de solutos compatíveis (Munns & Gilliam, 2015). No caso do ajustamento osmótico, esse efeito em plantas halófitas, é realizado de forma mais eficiente, de um ponto de vista energético, por meio de íons inorgânicos, uma vez que a síntese de solutos orgânicos demandaria um gasto energético adicional, que comprometeria seu crescimento. Dessa forma, a pressão evolutiva resultou em plantas que se utilizam de íons de Na⁺ e Cl⁻ em quantidades suficientes para ajustar o volume total das células, sem comprometer o metabolismo celular (Flowers et al., 2015). Além disso, um mecanismo muito difundido e eficaz é a eliminação dos sais por meio de vesículas especializadas existentes na superfície das folhas, onde o sal cristaliza (Souza et al., 2011).

Diante das variáveis envolvidas na salinidade do solo, é necessário intensificar as pesquisas para distinguir a ação dos agentes de estresse salino, aliada às respostas das diferentes espécies vegetais a este estresse. Dessa forma, será possível estabelecer bases confiáveis para aplicação da técnica da fitorremediação em solos afetados por sais, com práticas agrônômicas que possibilitem a melhoria da qualidade dos solos, garantindo sua sustentabilidade e contribuindo para a segurança alimentar mundial.

4.5. Composição mineral das partes da planta

As respostas das plantas quanto à composição foliar têm a acumulação de sódio e cloro assumindo posição de destaque entre os íons avaliados. As concentrações foliares desses elementos foram análogas entre os tratamentos onde as plantas de nim, sabiá e leucena foram implantadas, não diferindo estatisticamente pelo teste Tukey ($P < 0,05$). No entanto, os teores desses elementos nas folhas das plantas de atriplex foram bem superiores às outras espécies com diferenças significativas, mas não entre o cultivo isolado e o consorciado (Figura 20 A e B).

A maior acumulação de Na^+ e Cl^- observada nas folhas de atriplex se deve à alta afinidade das células de plantas halófitas com íons salinos, especialmente o sódio, como foi demonstrado por vários autores (Glenn et al., 1999; Martinez et al., 2003; 2005; Flowers, 2004; Ben Hassine et al., 2008; 2010; 2012, Shelef et al., 2013, Melo et al., 2016). Adicionalmente, a maioria das espécies que utiliza as rotas C4 de fixação do carbono requerem íons sódio. Nestas plantas, o sódio parece ser vital para a regeneração do fosfoenolpiruvato, substrato da primeira carboxilação nas rotas C4, além de estimular o crescimento por meio de uma maior expansão celular e, ainda, substituir parcialmente o potássio como um soluto osmoticamente ativo (Larcher, 2000).

Observou-se, também, que ocorreu um incremento na absorção de sódio e cloro ao longo do tempo nas folhas da atriplex, com diferenças significativas ($P < 0,05$) entre a primeira época de avaliação e as demais, enquanto que se verificou estabilidade nos teores foliares de sódio e cloro nas plantas de nim, sabiá e leucena (Figura 20).

É relatado por Aouissat et al. (2011) que plantas de *Atriplex halimus* cultivadas em soluções salinas entre 10 e 40 dS m^{-1} têm concentrações de sais em folhas em torno de 20-30 g kg^{-1} , respectivamente. Do mesmo modo, Gharaibeh et al. (2011) relataram valores em espécies do gênero *Atriplex* cultivadas sob condições salinas com concentrações foliares variando entre 130-270 g kg^{-1} .

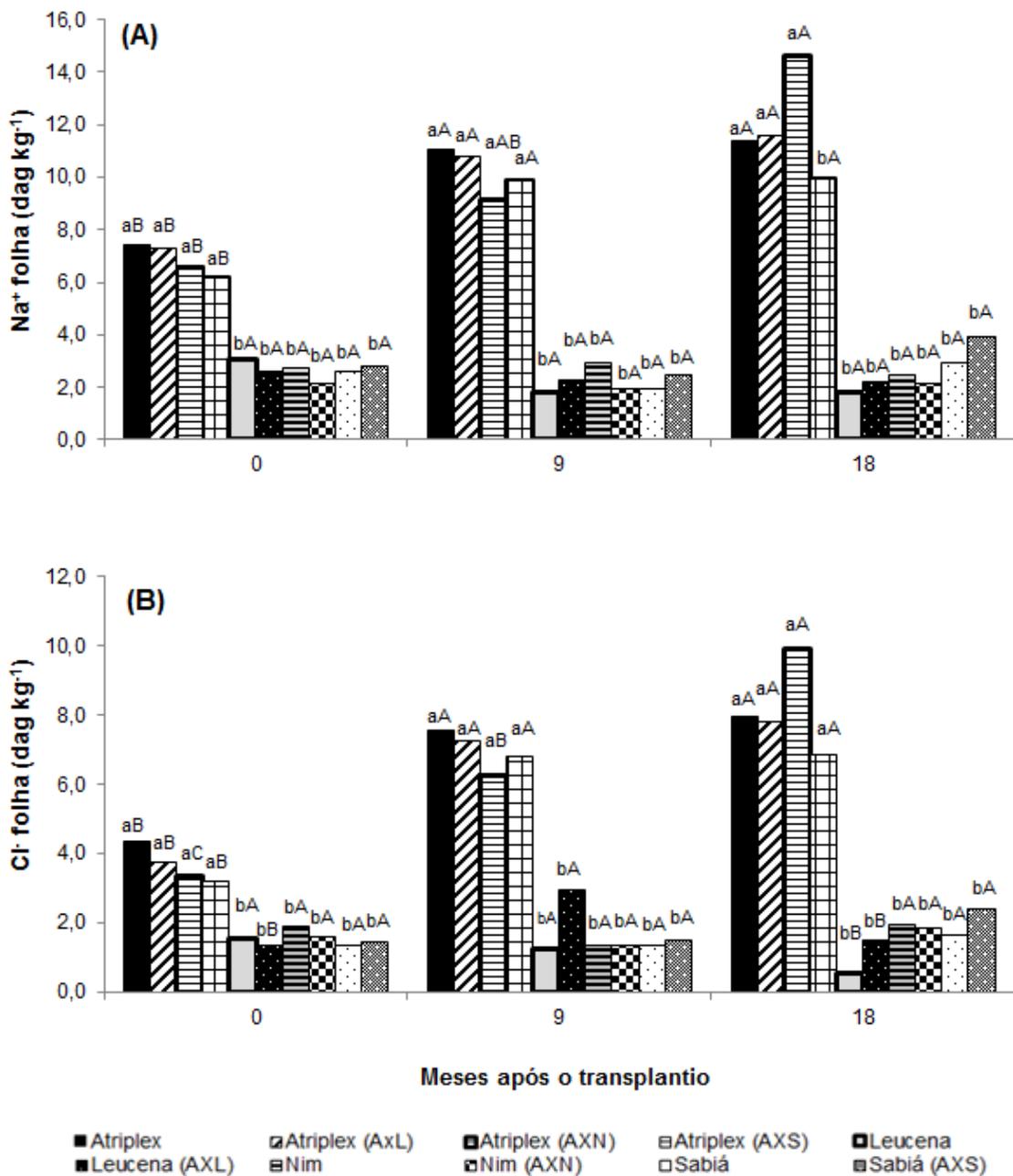


Figura 20. Teores foliares de sódio (A) e cloro (B) em plantas de atriplex, leucena, nim e sabiá, em cultivo isolado e em consórcio, aos 0; 9 e 18 meses após o transplântio. Letras minúsculas iguais comparam médias que não diferem estatisticamente entre os tratamentos; e as maiúsculas entre os tempos de cultivo; ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Atriplex (AxL) – Planta de atriplex do consórcio com leucena; Leucena (AXL) – Planta de leucena do consórcio com atriplex; Atriplex (AxN) – Planta de atriplex do consórcio com nim; Nim (AxN) – Planta de nim do consórcio com atriplex; Atriplex (AxS) – Planta de atriplex do consórcio com sabiá; Sabiá (AxS) – Planta de sabiá do consórcio com atriplex.

No presente estudo, a menor participação foliar de cloro em contraste à de sódio (1/1,5) observada nas plantas, é contraditória aos valores apresentados por Alves (2012), Bazihizina et al. (2012), Souza et al. (2014) e Melo et al. (2016).

Provavelmente, as plantas de *Atriplex nummularia* Lindl acumularam muito mais sódio na matéria vegetal devido a sua maior avidéz pelo íon sódio em relação aos demais elementos, o que comprova seu elevado potencial extrator de sais de sódio e sua adequabilidade para uso na fitorremediação de solos afetados por sais, especialmente os sódicos. Dessa forma, é possível sugerir que quantidades significativas de sais podem ser extraídas de solos degradados pela salinidade com o cultivo de plantas dessa espécie. Adicionalmente, halófitas são consideradas como acumuladores de sal, pois possuem estruturas especializadas nas suas folhas o que lhes confere compartimentalizar e excluir estes íons nos tricomas ou pelos vesiculares.

Outros estudos, também desenvolvidos em campo sob condições salinas, tais como os de Glenn et al. (1999), Porto et al. (2006), Glenn et al. (2009), Gharaibeh et al. (2011) e Souza et al. (2011) são de importância fundamental para a recuperação e revegetação de solos salinizados.

A implantação de halófitas, como é o exemplo a *A. nummularia*, é uma alternativa viável para áreas ambientalmente vulneráveis, portanto, deve-se levar em consideração as estratégias de avaliação do real impacto do cultivo de halófitas sobre processos do solo (Qadir & Schubert, 2003; Qadir et al. 2007; Anning et al., 2013).

Com relação às concentrações de potássio, foi observado um comportamento similar entre as espécies até os nove meses experimentais, com diferença significativa aos dezoito meses ($P < 0,05$), ocasião em que as plantas de atriplex superaram as outras espécies quanto à acumulação deste íon (Figura 21A). As concentrações de cálcio foram mais estáveis ao longo do tempo e não foi observada diferença estatística entre as espécies (Figura 21B).

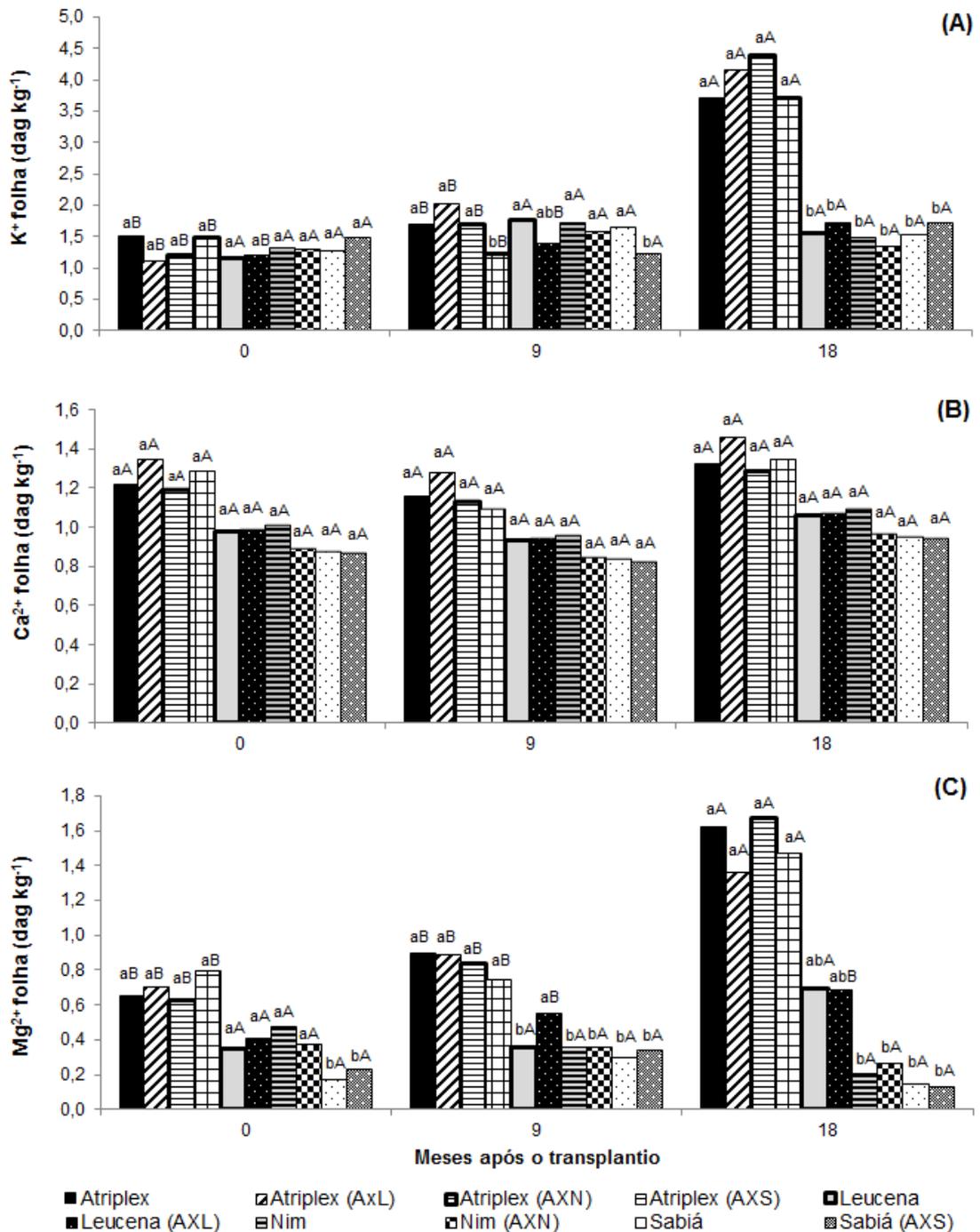


Figura 21. Teores foliares de potássio (A), cálcio (B) e magnésio (C) em plantas de atriplex, leucena, nim e sabiá, em cultivo isolado e consorciado, aos 0; 9 e 18 meses após o transplântio. Letras minúsculas iguais comparam médias que não diferem estatisticamente entre os tratamentos; e as maiúsculas entre os tempos de cultivo; ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Atriplex (AxL) – Planta de atriplex do consórcio com leucena; Leucena (AXL) – Planta de leucena do consórcio com atriplex; Atriplex (AxN) – Planta de atriplex do consórcio com nim; Nim (AxN) – Planta de nim do consórcio com atriplex; Atriplex (AxS) – Planta de atriplex do consórcio com sabiá; Sabiá (AxS) – Planta de sabiá do consórcio com atriplex.

Quanto ao magnésio, houve comportamento semelhante entre as espécies no início do experimento, exceto para o sabiá, sendo observados os menores teores em relação às demais espécies (Figura 21 C). No entanto, isso foi sendo alterado com o tempo, com a atriplex expressando maiores teores de magnésio em comparação às outras espécies estudadas, mas sem diferença entre a primeira e a segunda avaliação 0 e 9 MAT). Ao final do experimento (18 MAT), foi observada elevação nas concentrações foliares de magnésio especialmente nas plantas de atriplex, seguidas pelas de leucena, e superando as de nim e sabiá (Figura 21C).

A dinâmica de absorção dos íons é determinada pelas proporções dos elementos no solo, ou seja, quanto mais alta a proporção de sódio entre os cátions trocáveis, menor é a porcentagem dos sítios de troca ocupados pelo cálcio, magnésio e potássio, dificultando a absorção destes. Assim, as concentrações, especialmente de K^+ , nas folhas podem ter sido inibidas pelas altas concentrações de sódio no solo, pela competição entre esses dois íons.

Na literatura, há referência à existência de múltiplos sistemas de absorção com diferentes seletividades para Na^+ e K^+ , o que pode refletir a necessidade da planta em coordenar o influxo desses cátions (Munns et al., 2002; Munns & Tester, 2008; Sánchez et. al., 2015). A absorção de potássio pode ocorrer por duas vias, com alta e baixa afinidade por este íon, o qual se ajusta de acordo com o estímulo ambiental. Em plantas que apresentam alta seletividade K^+/Na^+ , é provável que o sistema de absorção de K^+ alcance um estágio com alta afinidade por este e, com isto, estabeleça uma redução, ao menos relativa, no influxo de Na^+ (Nogueira et al., 2005; Morais et al., 2007).

O potássio é importante em ambientes salinos, pois promove a estabilidade do *status* hídrico nas plantas (Taiz & Zeiger, 2013) e a sua aquisição pelas plantas em ambientes salinos, torna-se muito influente na tolerância aos sais (Slama et al., 2008). A falta de incremento na acumulação de potássio relaciona-se a aumentos no efluxo deste nutriente em virtude, provavelmente, de uma permeabilidade maior da membrana das células radiculares, por efeito do Na^+ . Esta maior permeabilidade em condições de salinidade deve-se, em grande parte, à troca do Ca^{2+} da membrana por Na^+ (Esteves & Suzuki, 2008).

Exceto a espécie *A. nummularia*, que teve comportamento padrão de uma halófita, hiperacumulando sódio e cloro, (Glenn et al., 2012), a absorção de

potássio, cálcio e magnésio pelas plantas, relativamente à acumulação de íons salinos (Na^+ e Cl^-), indica que as plantas não foram eficientes em regular a absorção e translocação desses elementos para a parte aérea.

Isso também foi observado nos estudos realizados por Silveira et al. (2009) e Bouchnak et al. (2012), verificando que, em raízes de plantas de *Atriplex nummularia* sob estresse salino, houve menor translocação do conteúdo de potássio para a parte aérea da planta, diminuindo com o aumento na condutividade elétrica, fato em consonância com o comportamento apresentado no presente estudo.

Nas plantas de nim, os teores foliares de potássio, embora inferiores aos íons salinos foram mantidos dentro do limite satisfatório para a espécie, segundo a classificação estabelecida por Drechsel & Zech (1991). Esses autores citam que árvores de nim, com idade entre um a dez anos, cultivadas em condições adequadas que apresentam teores (dag kg^{-1}) de K em torno de 0,17 são consideradas como deficientes; entre 0,15 e 0,18 os teores são considerados baixos; e teores de K entre 0,65 e 1,79 são classificadas como satisfatórios. Isso pode indicar certo grau de tolerância esse nível de salinidade do solo. Diferentemente, Freire et al. (2010b) verificaram em plantas de nim cultivadas em solos salinos, que o transporte de potássio para a parte aérea diminuiu com o aumento do sódio.

Quanto ao cálcio, os teores encontrados nas folhas de nim remetem a uma planta de característica glicófita, com as concentrações dentro dos padrões para esse grupo de plantas. Em um trabalho conduzido por Neves & Carpanezzi (2006), com plantas de nim aos 2; 5 e 20 anos cultivadas em solos eutróficos, foram observados teores foliares (dag kg^{-1}) de cálcio entre 0,14 e 0,57; de magnésio entre 0,016 e 0,170 e de potássio entre 0,008 e 0,250. A estabilidade entre as três épocas de amostragem, mesmo em épocas com maiores níveis de sais, revela uma habilidade de absorção do elemento pelo nim, podendo tal fato estar associado à elevada CTC das raízes (Neves et al., 2013).

Comparando os teores de Na^+ em plantas de leucena em solo salino e não salino, foi constatado que esta não é eficiente em regular a absorção do elemento (Freire & Rodrigues, 2009). Isso se deve ao movimento de sais das raízes para a parte aérea, resultante da taxa transpiratória, necessária para a manutenção da condição hídrica da planta (Yao et al., 2012).

Quanto aos teores de potássio nas plantas de leucena em associação com a atriplex, foram observados incrementos ao longo do tempo, em contrapartida, essa tendência não foi verificada nas plantas em cultivo isolado, que mantiveram essas concentrações em níveis mais estáveis (Figura 21). Os teores de cálcio e magnésio não variaram significativamente entre as épocas de amostragem, não sendo observada influência das condições experimentais sobre os teores dos referidos elementos em plantas de leucena.

Este comportamento foi confirmado por Freire et al. (2010a), quanto a composição de K^+ na parte aérea de leucena, que observaram elevação desse íon com o aumento da salinidade e, ao mesmo tempo, contrariados quanto aos teores de Mg e Ca, os quais foram reduzidos com aumento na dose de NaCl.

As espécies glicófitas nim e leucena não externaram sintomas visuais de toxidez, o que induz que essas possuem estratégias para manutenção de sua homeostase, a qual pode sofrer influência, mesmo que tímida, da acumulação de solutos inorgânicos.

As respostas adaptativas das plantas de sabiá foram mais evidentes visualmente, expressas pelo amarelecimento das folhas seguido de perda de parte dessas, o que pode estar associado à toxidez provocada pelos íons salinos, e o que justificaria, em parte, o decréscimo na fotossíntese no período com níveis mais elevados de sais.

É possível afirmar ainda que o acúmulo de solutos inorgânicos tenha promovido por critério de adaptabilidade às condições de estresse às quais as plantas foram submetidas, o estacionamento do crescimento das plantas de sabiá com prejuízo à produção de biomassa. Lançando mão desses recursos para reduzir os efeitos das concentrações de sais no solo.

Na avaliação da composição dos ramos (Figura 22), as plantas de atriplex tiveram comportamento similar ao que foi observado nas folhas (Figura 21). Houve incremento nos teores de sódio e cloro ao longo do experimento, no entanto, só foi observada diferença estatística aos dezoito meses nos tratamentos em que a atriplex esteve em cultivo isolado ou em associação com o sabiá.

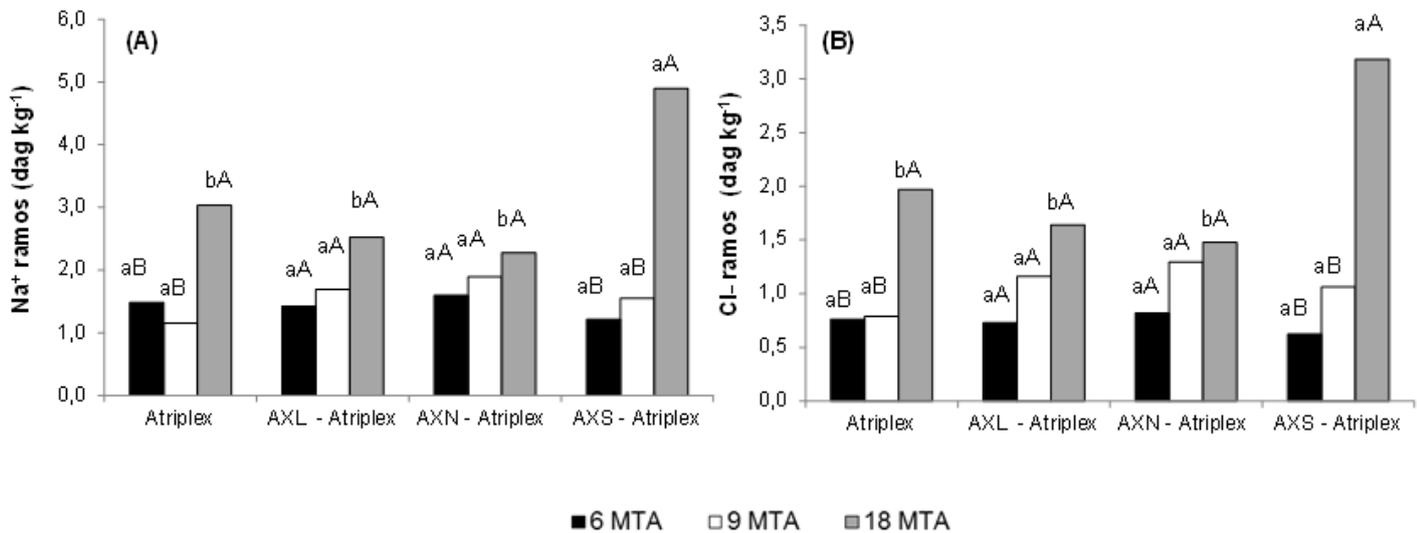


Figura 22. Teores de sódio (A) e cloro (B) nos ramos de atriplex coletados aos 6, 9 e 18 meses após o transplântio. Letras minúsculas iguais comparam médias que não diferem estatisticamente entre os tratamentos; e as maiúsculas entre os tempos de cultivo; ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Atriplex (AxL) – Planta de atriplex do consórcio com leucena; Atriplex (AxN) – Planta de atriplex do consórcio com nim; Atriplex (AxS) – Planta de atriplex do consórcio com sabiá.

Em relação às folhas, a acumulação de sódio e cloro nos ramos foi bem inferior, em média 18% para o sódio e 24% para o cloro. Provavelmente, essa expressiva diferença deve-se à presença de pelos vesiculares localizados, principalmente, na superfície das folhas desta planta (Qadir, 2007; Willadino & Câmara, 2010). De acordo com Sharma (1982), essas vesículas são constituídas por células vacuoladas, com diâmetro que variam de 100 a 200 μm , ricas em sais, que se constituem elementos reguladores das concentrações eletrolíticas da folha servindo, especialmente, para a reserva dos excedentes de NaCl.

Algumas plantas halófitas desenvolveram estruturas denominadas “glândulas de sais”, que possuem como função a excreção do excesso de sais. Podem ser encontradas nas células epidérmicas do caule e, principalmente, das folhas. As glândulas de sais contribuem para a adaptação da planta à salinidade, desempenhando um importante papel na osmoregulação e permitindo que a planta mantenha equilibrado o seu potencial osmótico, estabilizando os gradientes de pressão osmótica (Ding et al., 2009; 2010).

Outras estruturas que atuam no controle do elevado acúmulo de íons são as células vesiculares, também conhecidas como tricomas glandulares. O desenvolvimento dessas estruturas sugere um mecanismo anatômico de

adaptação ao estresse salino, podendo ser encontradas em espécies como *Vigna unguiculata* (Garzón & García, 2011), *Mesembryanthemum crystallinum* (Agarie et al., 2007), *Alternanthera halimifolia*, *Egletes prostrata*, *Argusia gnaphalodes* (García et al., 2008) e *Atriplex halimus* (Smaoui et al., 2011).

A concentração dos íons nos ramos foi mais expressiva quanto a presença de cloreto e sódio, concordando com a afirmativa de Araújo et al. (2006), que indicaram a existência de coordenação entre a acumulação de sódio e cloro, sugerindo um mecanismo de alto nível integrado entre os sistemas de captação desses dois íons.

Após o sódio e o cloro, a ordem de absorção dos íons foi seguida por potássio, cálcio e magnésio (Figura 23). Variações ao longo do tempo também foram observadas nos teores potássio e cálcio, mas o teor de magnésio não teve variação com o tempo.

A diferença entre o teor de magnésio nas folhas e ramos está associada a presença do elemento na molécula de clorofila, a qual está predominantemente presente nas folhas (Taiz & Zeiger, 2010).

Por terem completado seu ciclo reprodutivo durante o experimento, as plantas de leucena chegaram a florescer e frutificar antes dos 9 MAT, possibilitando a coleta desse material para análise aos 9 e 18 MAT (Figura 24). Nas inflorescências, frutos e sementes de leucena, o acúmulo de íons ocorreu de forma diversa ao que houve nas folhas. Nesses órgãos reprodutivos foram observados menores teores de sódio, cloreto e cálcio comparativamente às folhas e concentrações análogas de potássio e magnésio. Os valores não sofreram variações significativas entre as épocas de avaliação, não sendo observadas diferenças estatísticas ($P < 0,05$).

O papel dos elementos minerais no metabolismo vegetal tem bastante relevância, no entanto, a literatura disponível sobre estudos referentes às concentrações destes nutrientes em plantas de nim, leucena e sabiá cultivado em condições de salinidade ainda são escassos, apesar de serem plantas com potencial de uso nesses ambientes de estresse e com habilidade para regeneração de áreas degradadas. Estudos mais aprofundados se fazem necessários para elucidar essas questões.

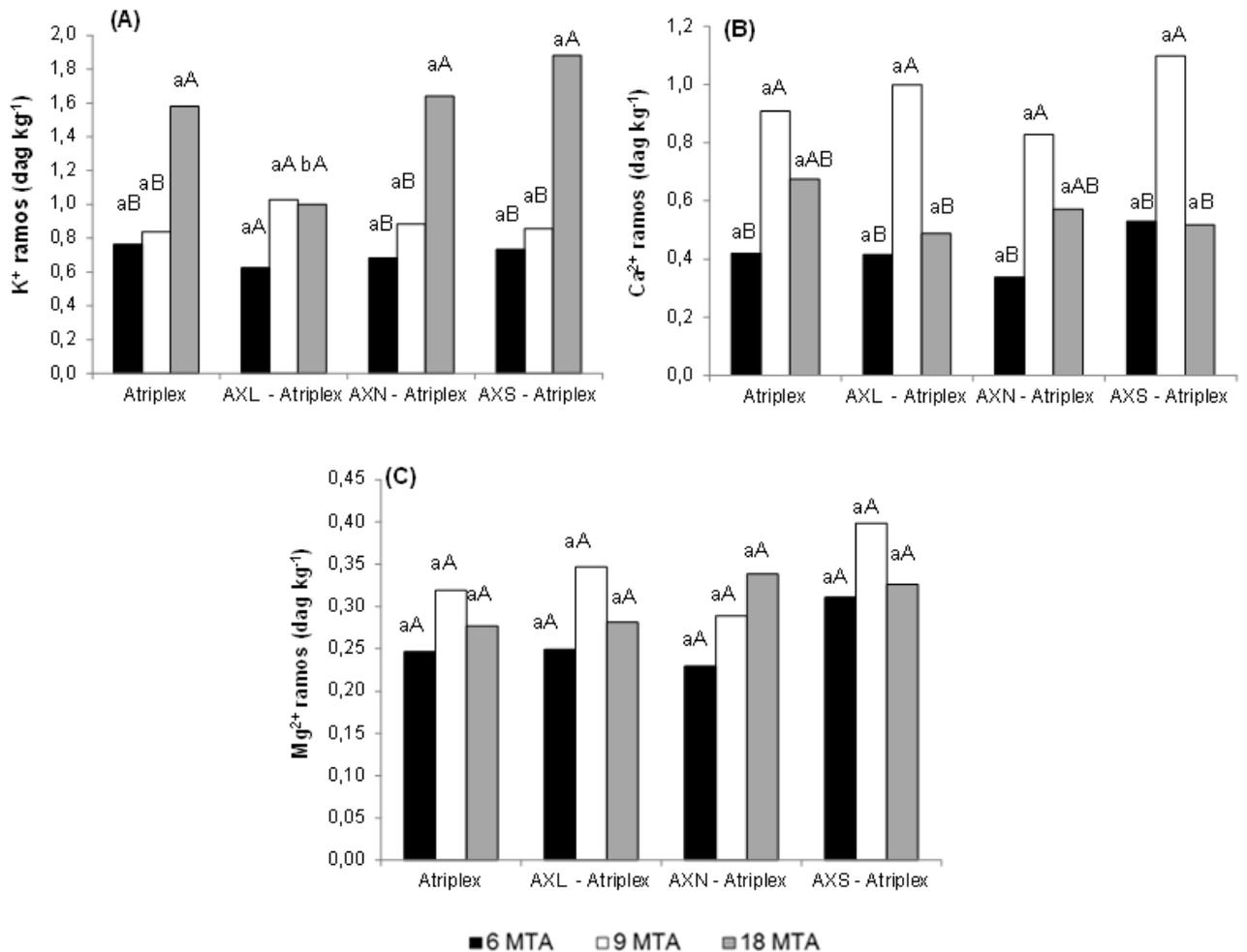


Figura 23. Teores de potássio (A), cálcio (B) e magnésio (C) nos ramos de atriplex coletados aos 6, 9 e 18 meses após o transplante. *Letras minúsculas iguais comparam médias que não diferem estatisticamente entre os tratamentos; e as maiúsculas entre os tempos de cultivo; ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Atriplex (AxL) – Planta de atriplex do consórcio com leucena; Atriplex (AxN) – Planta de atriplex do consórcio com nim; Atriplex (AxS) – Planta de atriplex do consórcio com sabia.*

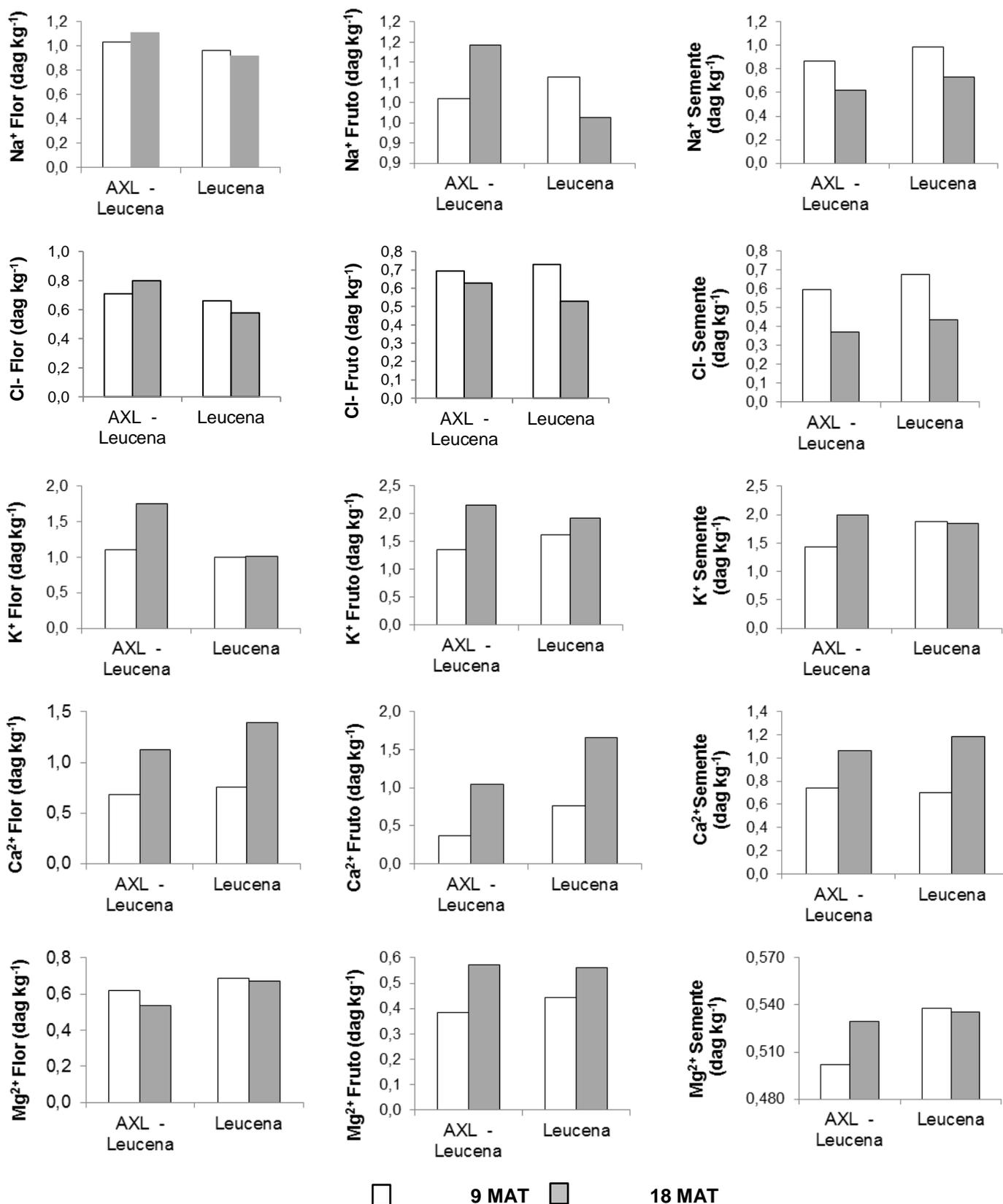


Figura 24. Teores de sódio, cloro, potássio, cálcio e magnésio nas inflorescências, frutos e sementes de leucena coletados aos 9 e 18 meses do experimento.

4.6. Solutos orgânicos

Na avaliação bioquímica de folhas das plantas estudadas, verificou-se variação no acúmulo de aminoácidos entre as espécies (Figura 25A). No entanto, essas diferenças não seguiram comportamento padrão que indique se o acúmulo ou o decréscimo ocorreu em função do efeito da salinidade. Todavia, as plantas de sabiá destacaram-se quanto aos aminoácidos livres, superando as demais espécies estudadas, especialmente aos 18 MAT, o que revela uma relação com os níveis de prolina encontradas nas plantas.

O acúmulo intracelular de solutos osmoticamente ativos em resposta às condições estressantes de baixa disponibilidade de água e salinidade é um importante mecanismo desenvolvido pelas plantas que toleram certos níveis de estresse com baixo potencial hídrico (Chaves Filho & Stacciarini-Seraphin, 2001).

O ajustamento osmótico, acompanhado pelo acúmulo de íons inorgânicos no vacúolo e de solutos orgânicos compatíveis (osmoprotetores) no citoplasma, são os mecanismos utilizados pela planta, para baixar o potencial hídrico celular e sobreviver ao estresse salino (Sacramento et al., 2014). Nesse contexto, os aminoácidos e carboidratos solúveis são considerados solutos orgânicos importantes, para o ajustamento osmótico de plantas submetidas a estresse hídrico e salino (Oliveira et al., 2006). No entanto, importância e contribuição dos solutos envolvidos no ajustamento osmótico em resposta à baixa disponibilidade de água variam com a espécie (Scalon et al., 2011). Quanto aos teores de carboidratos solúveis, nas folhas das plantas de atriplex, cultivada isoladamente ou em consórcio, não foi observado um padrão de acumulação ao longo do tempo (Figura 25B). Essa resposta corrobora a afirmação de Ashraf & Harris (2004), quando indica que o papel dos açúcares na adaptação de plantas às condições salinas é insuficiente para definição de espécies que apresentam tolerância ao sal, em razão de variações interespecíficas e intraespecíficas.

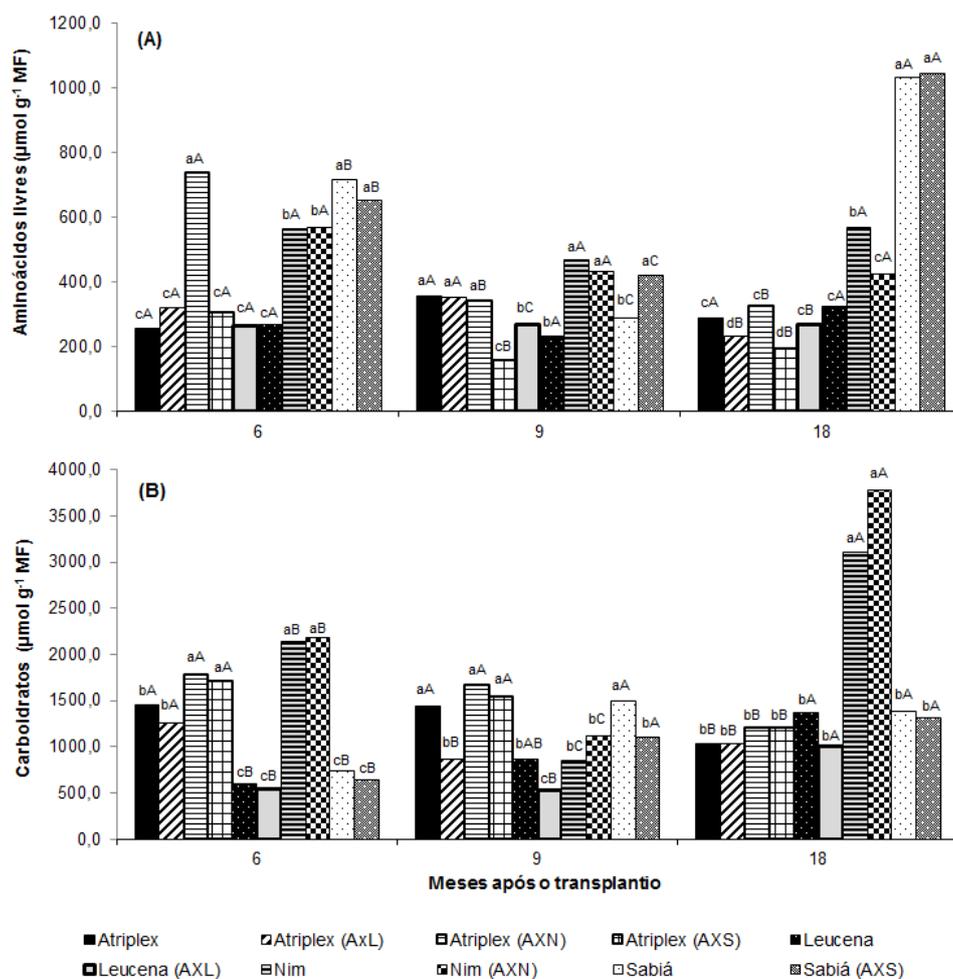


Figura 25. Teores foliares de aminoácidos livres (A) e carboidratos solúveis (B) em plantas de atriplex, leucena, nim e sabiá, em cultivo isolado e consorciado, aos 6; 9 e 18 meses após o transplante. *Letras minúsculas iguais comparam médias que não diferem estatisticamente entre os tratamentos; e as maiúsculas entre os tempos de cultivo; ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Atriplex (AxL) – Planta de atriplex do consórcio com leucena; Leucena (AXL) – Planta de leucena do consórcio com atriplex; Atriplex (AxN) – Planta de atriplex do consórcio com nim; Nim (AxN) – Planta de nim do consórcio com atriplex; Atriplex (AxS) – Planta de atriplex do consórcio com sabiá; Sabiá (AxS) – Planta de sabiá do consórcio com atriplex.*

Quanto às plantas de nim, foi observada superioridade nos teores de carboidratos nas folhas somente na primeira e última avaliação, com diferença significativa ($p < 0,05$) (Figura 25B). E houve similaridade entre as plantas de leucena e sabiá (Figura 25B), com os teores solúveis totais de carboidratos nas folhas mantendo-se crescentes com o tempo.

De modo geral, nas plantas de leucena, nim e sabiá os valores foram mais elevados quando os teores de sais no solo foram maiores (18 MAT) (Figura 5A), indicando uma correlação positiva entre os níveis de carboidratos na planta e a salinidade nestas espécies. Fazendo referência a uma provável indução de adaptação ao estresse salino e hídrico, com a finalidade de manter o nível de água da folha e induzir um ajustamento osmótico na planta, visando o equilíbrio osmótico da célula. Isso foi sugerido por Parida et al. (2005), que consideram o aumento do teor de carboidratos como uma ação fundamental na regulação osmótica e manutenção dos níveis de água nas folhas.

No que se refere ao acúmulo de proteínas solúveis, sabe-se que muitas plantas têm a síntese proteica estimulada quando submetidas a condições salinas. Tal proposição foi confirmada pelos resultados encontrados no presente estudo, onde foi observado aumento nos teores de proteínas solúveis totais em todos os tratamentos empregados (Figura 26), em função do maior incremento da concentração salina na solução do solo, que ocorreu aos 18 MAT (Tabela 5).

Entretanto, houve diferença entre as épocas de avaliação quando as plantas de atriplex foram cultivadas em associação com as outras espécies e isoladamente (Figura 26). Com a atriplex cultivada isoladamente, foram constatados maiores valores de proteínas solúveis nas épocas em que a salinidade e indisponibilidade hídrica foram mais pronunciadas, ou seja, aos 6 e 18 MAT. No cultivo consorciado, a diferença estatística na acumulação de proteínas apenas foi observada aos 18 MAT.

Nas plantas de leucena, não houve diferença para proteínas solúveis aos 6 e 18 MAT entre cultivo isolado e em consórcio com a atriplex. Só foi verificada diferença aos 9 MAT, quando os teores de proteínas solúveis nas plantas cultivadas isoladamente foram superiores aos das plantas em associação com a atriplex. Quando comparados entre as épocas de avaliação, os teores foliares elevaram-se significativamente aos 18 MAT.

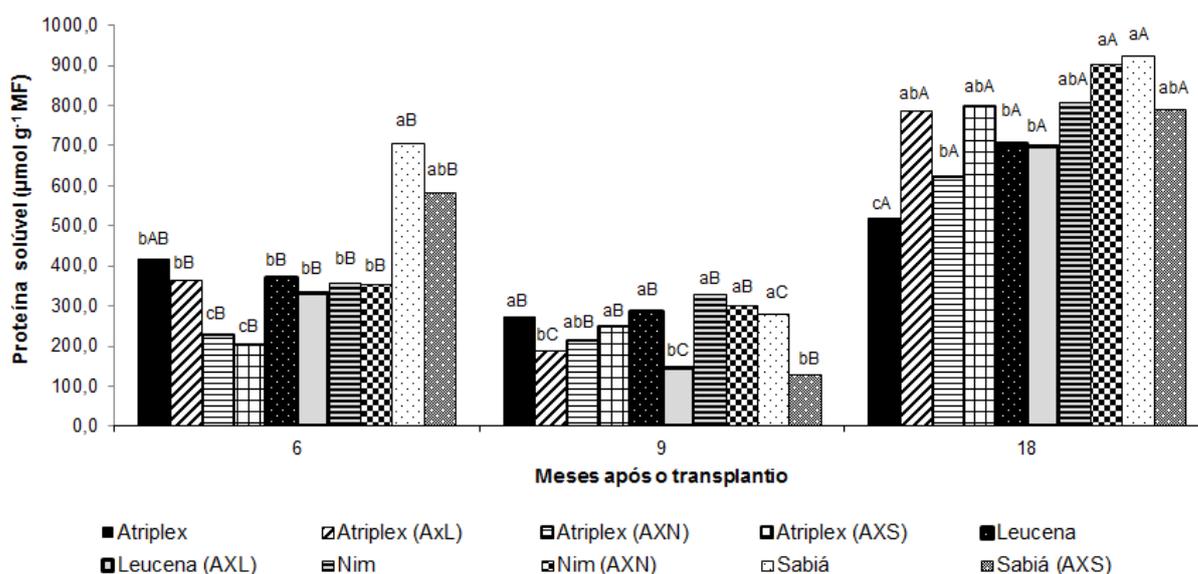


Figura 26. Teores foliares de proteínas solúveis em plantas de atriplex, leucena, nim e sabiá, em cultivo isolado e consorciado, aos 6; 9 e 18 meses após o transplântio. Letras minúsculas iguais comparam médias que não diferem estatisticamente entre os tratamentos; e as maiúsculas entre os tempos de cultivo; ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Atriplex (AxL) – Planta de atriplex do consórcio com leucena; Leucena (AXL) – Planta de leucena do consórcio com atriplex; Atriplex (AxN) – Planta de atriplex do consórcio com nim; Nim (AxN) – Planta de nim do consórcio com atriplex; Atriplex (AxS) – Planta de atriplex do consórcio com sabiá; Sabiá (AxS) – Planta de sabiá do consórcio com atriplex.

Quanto aos teores de proteínas solúveis nas folhas das plantas de nim, só foi observado aumento significativo ao final do experimento (18 MAT) ($p < 0,05$), com incremento da ordem de 60,85% (atr x nim) e 55,50% (nim) (Figura 26).

Dentre as espécies de plantas testadas, as de sabiá destacaram-se no acúmulo de proteínas aos 6 MAT e 18 MAT, com diminuição nas

concentrações de proteínas solúveis aos 9 MAT, essa tendência foi observada similarmente tanto no cultivo isolado quanto em consórcio (Figura 26).

Esses acúmulos podem estar associados à síntese de proteínas envolvidas no mecanismo de tolerância à salinidade, as quais podem atuar na estabilização das membranas celulares e na sinalização de respostas à salinidade (Mendes et al., 2011). Considerando que o estresse salino aumentou o conteúdo de proteínas solúveis, é possível que esse aumento seja consequência do elevado teor de aminoácidos (Sacramento et al., 2014).

A interação entre as condições estressantes e os tratamentos empregados sobre o conteúdo de prolina foi notável (Figura 27). As plantas de sabiá, nim e leucena, em cultivo isolado ou em consórcio com a atriplex, tiveram acúmulo de prolina nas folhas relacionados com as épocas em que a restrição de água no solo e a salinidade foram maiores (aos 6 e 18 MAT). Isso sugere que há uma resposta funcional comum levando à tolerância em ambas às situações. Estes dados podem confirmar o principal papel convencional da prolina na tolerância ao sal como um osmoprotetor celular.

Foi verificado que o nível de prolina nas folhas de leucena, nim e sabiá foram maiores nas épocas de avaliação em que houve aumento da salinidade do solo. O teor de prolina na parte aérea das plantas de sabiá foi bem maior que nas outras espécies estudadas, diferenciando-se estatisticamente ao nível de 0,05 pelo teste Tukey nas três épocas de avaliação (Figura 27).

Essa acumulação de prolina, sobretudo o alto contraste verificado em *M. caesalpiniaefolia*, pode indicar uma maior sensibilidade dessa espécie às condições impostas no campo; e pode ser parte do sinal do estresse, influenciando as respostas adaptativas de resistência ao estresse (Hayat et al., 2012). (Venkatesu et al., 2007) afirmam que plantas sob estresse têm os níveis intracelulares de prolina aumentados mais de 100 vezes. Do mesmo modo Verslues & Sharma (2010) demonstraram que a espécie *Arabidopsis thaliana*, acumularam taxas de prolina 100 vezes maiores relativamente ao nível de controle em mudas expostas a um baixo potencial de água. Após supressão do estresse, o processo foi totalmente revertido, com a prolina diminuindo para um nível basal em alguns dias.

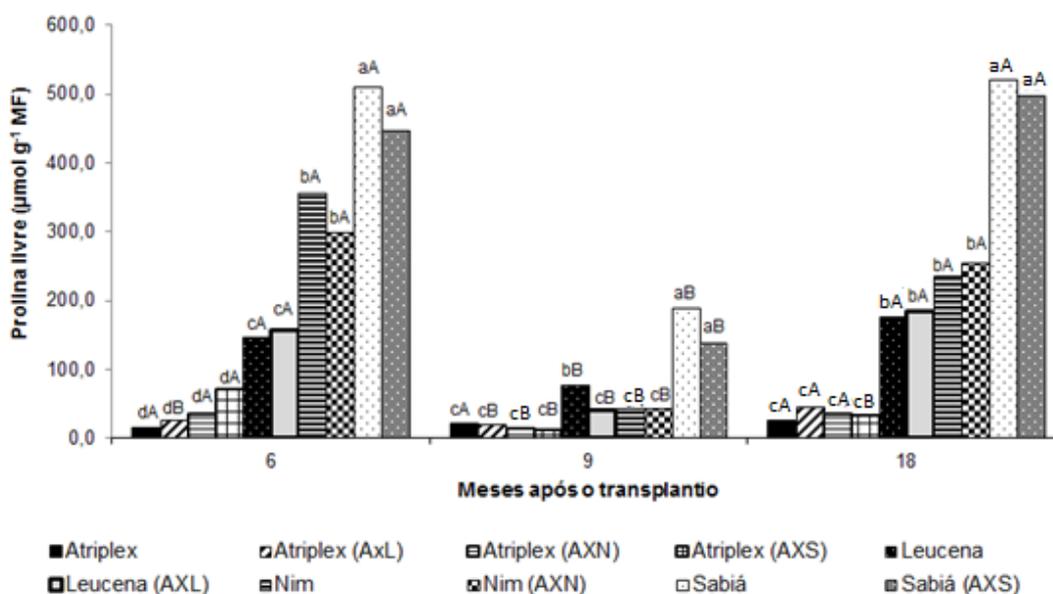


Figura 27. Teores foliares de prolina livre em plantas de atriplex, leucena, nim e sabiá, em cultivo isolado e consorciado, aos 6; 9 e 18 meses após o transplante. Letras minúsculas iguais comparam médias que não diferem estatisticamente entre os tratamentos; e as maiúsculas entre os tempos de cultivo; ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Atriplex (AxL) – Planta de atriplex do consórcio com leucena; Leucena (AXL) – Planta de leucena do consórcio com atriplex; Atriplex (AxN) – Planta de atriplex do consórcio com nim; Nim (AxN) – Planta de nim do consórcio com atriplex; Atriplex (AxS) – Planta de atriplex do consórcio com sabiá; Sabiá (AxS) – Planta de sabiá do consórcio com atriplex.

No caso particular das plantas de sabiá, nos períodos do experimento em que as precipitações foram menores, foi observada abscisão ds folhas. Embora não esteja totalmente compreendido como ocorre o metabolismo da prolina sobre a senescência foliar, alguns autores sugerem que os níveis de prolina aumentam proporcionalmente com a idade da folha em segmentos de folhas excisadas e são um indicador de senescência foliar (Price et al., 2008; Kotakis et al., 2014; Faes et al., 2015).

Em muitas espécies de plantas, a acumulação de prolina sob estresse salino tem sido correlacionada com a tolerância ao estresse, e a sua concentração tem sido mostrada mais elevada em espécies tolerantes à salinidade em relação a plantas sensíveis (Hayat et al., 2012).

Os mecanismos moleculares pelos quais a prolina protege as células durante períodos de estresse não estão completamente elucidados, mas

parecem envolver as suas propriedades químicas e efeitos sobre o sistema redox. A função de prolina na adaptação ao estresse muitas vezes é explicada por sua propriedade como um osmólito e sua capacidade de equilibrar o estresse hídrico. No entanto, condições ambientais adversas, muitas vezes perturbam a homeostase redox intracelular, necessitando de mecanismos que também atuem sobre o estresse oxidativo. (Mattioli et al., 2009; Liang et al., 2013). Sua acumulação normalmente ocorre no citoplasma onde funciona como proteínas moleculares adventícias, estabilizando a estrutura das proteínas e enzimas antioxidantes e promovendo a manutenção do estado redox da célula, através, por exemplo, do estabelecimento da relação $\text{NADP}^+/\text{NADPH}$ compatível com o metabolismo (Ben Rejeb et al., 2014; Fichman et al., 2015).

Paralelamente, a acumulação de prolina (e outros solutos) diminui o potencial osmótico celular para equilibrar reduções no potencial de água no solo, permitindo turgor e manutenção do conteúdo de água. A prolina se acumula no citoplasma e estroma do cloroplasto, enquanto outros solutos são acumulados no vacúolo. Uma vez que o citoplasma é uma pequena fração do volume celular, a expressão das concentrações locais de prolina no citoplasma pode ser muito mais elevada do que o nível em tecidos maiores da célula, assim, alterações nos níveis de prolina podem ter efeitos mais substanciais sobre o ajuste osmótico total, causando a acumulação adicional de potássio e outros solutos no vacúolo (Verslues & Sharma, 2010). Estas funções não são mutuamente exclusivas e, provavelmente, a razão pela qual as plantas acumulam prolina é que ele cumpre vários destes papéis ao mesmo tempo.

As plantas reagem de forma diferente ao estresse salino em referência ao acúmulo de prolina (Shavrukov, 2013). Em relação aos conteúdos de prolina livre encontrados nas folhas das plantas de atriplex até os 18 MAT, observou-se que o acúmulo de prolina permaneceu praticamente inalterado. Nos tratamentos em que a atriplex esteve presente não foi observada diferença significativa ($P < 0,05$) entre as épocas de avaliação, com exceção do tratamento em consórcio com o sabiá, onde houve redução dos teores (Figura 27). O percentual de prolina nas folhas de atriplex em relação ao *pool* de aminoácidos livres observado em todos os tratamentos foi baixo, flutuando entre 4 e 20%.

O impacto de estresses sobre a síntese de prolina em plantas de atriplex também foi registrado em outros experimentos, como o de Martinez et al. (2004), que não observaram envolvimento da prolina no ajustamento osmótico de plantas de *Atriplex halimus*, relacionando o evento ao baixo conteúdo desse soluto nas folhas das plantas em resposta ao déficit hídrico.

A acumulação de grandes quantidades de prolina é uma resposta adaptativa das plantas aos diferentes estresses bióticos e abióticos. No entanto, no tocante à contribuição relativa dos solutos inorgânicos e orgânicos para o ajustamento osmótico, a maior contribuição relativa de Na^+ e Cl^- nas folhas de plantas de atriplex exibem a grande avidez da espécie por íons salinos, essa contribuição dos íons salinos é indicação da habilidade da atriplex em se ajustar osmoticamente a concentrações elevadas de Na^+ e Cl^- . E, conseqüentemente, não sendo necessário o aumento dos teores de prolina no tecido celular.

Em um estudo com *Atriplex nummularia* cultivada em solo salino sódico sob diferentes potenciais hídricos, Souza et al. (2012) atribuíram aos íons Na^+ e Cl^- a maior influência no ajustamento osmótico das folhas das plantas.

A vasta utilização na natureza de prolina como uma molécula de adaptação expressa seu importante papel biológico na resposta ao estresse. O metabolismo da prolina é de interesse tanto para aqueles que procuram compreender melhor a fisiologia da planta ao estresse, bem como aqueles que procuram compreender a regulação metabólica. Dessa forma, compreender os mecanismos pelos quais a prolina influencia parte da estratégia de respostas das plantas aos estresses bióticos e abióticos facilitará a pesquisa com culturas agrícolas e delinear estritamente o que são cada mecanismo é uma peça fundamental para perspectivas futuras.

4.7. Potencial osmótico na planta

Em todos os períodos avaliados houve respostas decrescentes de potencial osmótico nas plantas das espécies estudadas (Figura 28) em função da redução do potencial osmótico do solo (Figura 6), com diferença significativa ($p < 0,05$). Isso ocorreu em consequência da presença de sais na solução do solo, os quais ocasionaram limitações na absorção de água pela planta, tornando mais negativo seu potencial osmótico (Munns & Tester, 2008). Como

resposta, verificou-se a acumulação de solutos orgânicos e inorgânicos nas células para o abaixamento do potencial osmótico na planta, favorecendo assim a entrada e a manutenção de água nas células.

Nas plantas de sabiá, nim e leucena, os valores menos negativos de potencial osmótico foram observados predominantemente aos 6 MAT, período das chuvas na região, diluindo os sais no solo. No tratamento em que o sabiá esteve sob cultivo isolado foi observado no início do experimento que o potencial osmótico foliar apresentou valor igual a $-0,500$ Mpa, com elevação do potencial, após três meses, para $-0,988$ Mpa, o que corresponde a um aumento da força potencial em torno de 50%. Essa taxa permaneceu, ao final do experimento, período seco, onde foi registrado redução no potencial. O mesmo comportamento foi observado para as plantas de sabiá em cultivo consorciado com a atriplex.

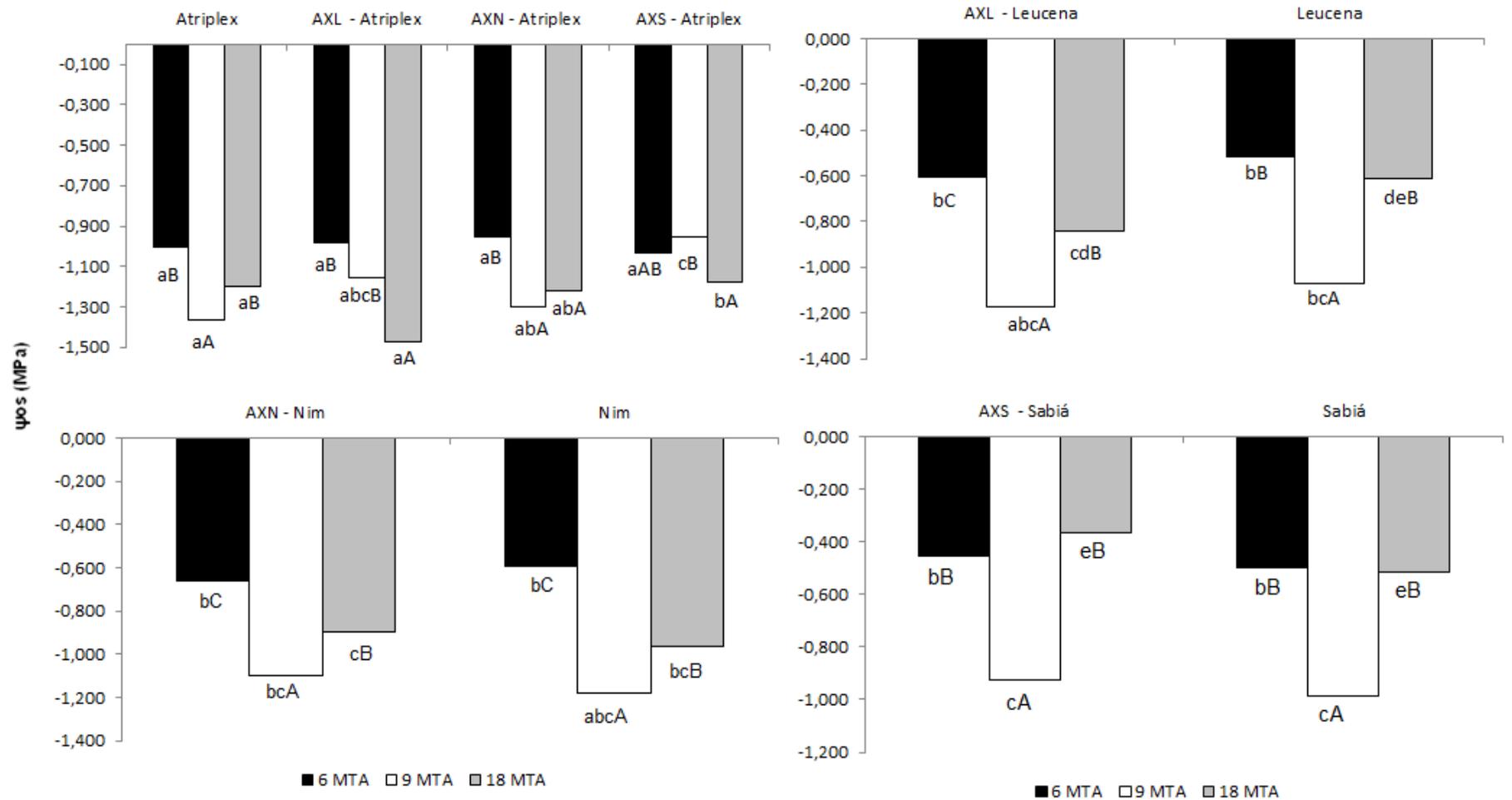


Figura 28. Potencial osmótico (Ψ_{os}) das folhas de plantas de atriplex (A), leucena (B), nim (C) e sabiá (D) em cultivo isolado e consorciado, aos 6; 9 e 18 meses após o transplante. Letras minúsculas iguais comparam médias que não diferem estatisticamente entre os tratamentos; e as maiúsculas entre os tempos de cultivo; ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Isso pode evidenciar a habilidade de ajustamento osmótico dessa planta, provavelmente pela relação positiva ao acúmulo de solutos compatíveis observado neste estudo, sobretudo como consequência das altas taxas de prolina livre encontradas (Figura 27).

No entanto, não foi verificado um comportamento linear entre os valores de potencial osmótico das folhas da atriplex entre as épocas de avaliação. Para esta planta, os valores do potencial osmótico foliar não tiveram grandes variações, com valores médios mínimo de -0,982 MPa e máximo de -1,369 Mpa (Figura 28).

Esse comportamento contraria resultados que vêm sendo demonstrados na literatura, uma vez que, como espécie halófito, a atriplex tem avidez por íons salinos; dentre os quais, especialmente o íon Na^+ tem forte envolvimento na osmorregulação de células de folhas de plantas de *Atriplex nummularia*, uma vez que é compartimentalizado nos vacúolos, ocupando em torno de 90% do volume total da célula (Munns, 2002).

Brilhante (2006), trabalhando com plantas de atriplex regadas com soluções de concentrações salinas crescentes, observou decréscimo significativo no potencial osmótico das folhas, chegando a um valor aproximado de -5,20 MPa na dose mais elevada de NaCl (400 mM). Esse comportamento correspondeu ao verificado por Souza et al. (2012), trabalhando com plantas de *Atriplex nummularia* em quatro níveis de umidade do solo (35, 55, 75 e 95% da capacidade de campo), que encontraram valor médio de potencial osmótico nas plantas igual a -49,29 atm, quando essas foram cultivadas em um solo com salinidade de 39,34 dS m^{-3} .

Provavelmente, o comportamento apresentado pelas plantas de atriplex no estudo com relação aos valores de potencial osmótico pode estar relacionado ao fato de as condições impostas no experimento não serem limitantes para essa espécie, uma vez que, por ser uma halófito, tolera grandes concentrações de sais e déficit hídrico e portanto não sendo necessário um grande ajuste osmótico.

Ao longo de todas as avaliações realizadas no experimento, as folhas das plantas de atriplex, nim e leucena sempre se estiveram expandidas, sugerindo ótimos níveis de turgescência.

4.8. Pigmentos fotossintéticos

Foram observadas flutuações nos teores de clorofila a, clorofila b, clorofila total e carotenoides entre as épocas de avaliação (Tabela 7), com incremento significativo ($P < 0,05$) nos valores de clorofila *a*; *b* e *total* aos nove meses do experimento, época em que foram registrados os menores valores de concentrações de sais no solo (Figura 8).

Os teores de carotenoides também variaram entre as épocas de avaliação, com um aumento com o tempo verificado em todas as plantas (Tabela 7). Essas observações podem indicar uma relação entre o acúmulo de pigmentos e a salinidade do solo, que pode ser explicado pelo argumento de Qureshi et al. (2013), ao afirmarem que o estresse salino provoca a redução na taxa de absorção de água pelas plantas com impacto negativo sobre a produção de pigmentos fotossintéticos.

No entanto, não há um consenso em relação ao acúmulo de pigmentos fotossintéticos em plantas cultivadas em condições estressantes. Mendes et al. (2011) reportam que o incremento nos teores de clorofila pode ser resultado do desenvolvimento do cloroplasto (aumento no número de tilacoides) ou do aumento no número de cloroplastos, sugerindo a ativação de um mecanismo de proteção ao aparato fotossintético.

No entanto, o estresse também pode atuar na planta impedindo a integridade do seu maquinário fotossintético. As alterações induzidas pelos sais no teor de clorofila nas folhas podem ser devido à biossíntese deficiente ou à aceleração da degradação dos pigmentos. O estresse salino pode quebrar a clorofila e esse efeito é atribuído ao aumento do nível tóxico do íon Na^+ (Yang et al. 2011), o qual inibe a síntese do ácido 5-aminolevulínico, molécula precursora da clorofila, ou aumenta a atividade da enzima clorofilase, que degrada a clorofila (Taiz & Zeiger, 2013).

Tabela 7. Teores foliares de clorofila a, clorofila b, clorofila total e carotenoides em plantas de atriplex, leucena, nim e sabiá, em cultivo isolado e consorciado, aos 6; 9 e 18 meses após o transplântio

Tratamento	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total	Carotenoides
	mg g ⁻¹ MF			
6 meses				
Atriplex	5,55 abB	2,16 aC	7,71 bC	0,66 bC
AXL - Atriplex	3,48 cC	1,76 aC	5,24 bC	0,53 bC
AXL - Leucena	4,40 bC	2,04aC	6,45 bC	0,58 bC
AXN - Atriplex	3,01 cC	1,48 bB	4,50 cC	0,37cC
AXN - Nim	6,50 aB	2,99 aB	9,48 aB	0,80 aC
AXS - Atriplex	4,35 bC	2,19 aB	6,54 bB	0,52 bC
AXS - Sabiá	2,73 cC	2,17aB	4,90 cC	0,56 bC
Leucena	2,94 cC	1,44 bC	4,38 cC	0,51 bC
Nim	6,82 aC	3,22 aC	10,03 aC	0,87 aC
Sabiá	4,18 bC	3,02 aC	7,20 bC	0,58 bC
9 meses				
Atriplex	24,78 bA	16,40 bA	41,18 bA	1,05 bB
AXL - Atriplex	18,30 bB	17,88 bA	36,18 bA	1,65 aB
AXL - Leucena	19,79 bB	13,58 bA	33,36 bA	1,79 aB
AXN - Atriplex	18,64 bA	34,14 aA	52,78 bA	0,98 bB
AXN - Nim	63,52 aA	25,36 aA	88,88 abA	1,82 aB
AXS - Atriplex	14,27 cB	8,33 cA	22,60 cA	1,41 aB
AXS - Sabiá	78,11 aA	8,57 cA	86,69 abA	1,32 abB
Leucena	67,34 aA	19,43 bA	86,78 abA	1,99 aB
Nim	93,30 aA	30,61 aA	123,91 aA	1,76 aB
Sabiá	97,10 aA	20,66 bA	117,76 aA	1,76 aB
18 meses				
Atriplex	20,05 bA	7,06 bB	27,11 bB	2,11 bA
AXL - Atriplex	35,29 abA	9,18 bB	44,47 abA	3,30 aA
AXL - Leucena	34,55 abA	8,21 bB	42,75 abA	3,59 aA
AXN - Atriplex	23,74 bA	11,01 bA	34,75 bB	1,96 bA
AXN - Nim	45,12 aA	21,80 aA	66,92 aA	3,64 aA
AXS - Atriplex	28,58 bA	5,24 cA	33,82 bA	2,82 abA
AXS - Sabiá	13,37 bB	2,37 cB	15,74 cB	2,64 abA
Leucena	21,86 bB	7,32 bB	29,18 bB	3,99 aA
Nim	37,77 abB	12,43 abB	50,20 aB	3,53 aA
Sabiá	27,15 bB	11,28 abB	38,43 bB	3,54 aA

Letras minúsculas iguais comparam médias que não diferem estatisticamente entre os tratamentos; e as maiúsculas entre os tempos de cultivo; ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Akram & Ashraf (2011), trabalhando com plantas de girassol (*Helianthus annuus*), mostraram diminuição do glutamato e o ácido 5-aminolevulínico (ALA) nas folhas e salientaram a influência marcante da salinidade sobre a biossíntese de clorofila.

Ashraf & Harris (2013) reportaram a fraca relação entre o Na⁺ e os pigmentos fotossintéticos e sugerem controvérsias na utilização da acumulação

de clorofila como marcador bioquímico para tolerância à salinidade, afirmando ainda que a elevação ou diminuição dos teores de clorofila a e b em plantas proporcionalmente às concentrações de sais dependem não de um grupo específico de plantas, mas da natureza das espécies vegetais ou cultivares. Os mesmos autores também salientam a influência negativa do estresse hídrico, provocando diminuição da clorofila, por meio de danos nos pigmentos fotossintéticos e deterioração dos tilacoides.

No entanto, Neves & Spat (2013) afirmam que há redução da clorofila pela competição da molécula de Na^+ , em dissolução, com a de Mg^+ na formação da clorofila. Enfatizando, ainda, que sob estresse salino as plantas exibem decréscimo significativo nos teores de clorofila a e b.

Geissler et al. (2015), trabalhando com duas halófitas, *Chenopodium quinoa* e *Atriplex nummularia*, observaram que as plantas tratadas com soluções salinas tiveram concentrações de clorofila significativamente inferiores às do tratamento controle. Os autores afirmaram que em ambas as espécies, não houve relações significativas entre a concentração de clorofila e a fotossíntese. No entanto Sánchez et al. (2015) verificaram disparidades no conteúdo de clorofila entre variedades de *Arundo donax* L., não sendo observado um padrão nas respostas das plantas.

A manutenção do teor de carotenoides nas plantas submetidas à salinidade sugere a manutenção do mecanismo de dissipação do excesso de energia luminosa. Estas moléculas também podem atuar como agentes antioxidantes protegendo os lipídios de membrana do estresse oxidativo gerado nas plantas expostas à salinidade (Sacramento et al., 2014).

4.9. Trocas gasosas

Foram observados diferentes comportamentos das espécies de plantas estudadas quanto às trocas gasosas, especialmente quanto à atriplex, bem como alterações conforme a época de medida (9 e 18 meses após o transplântio) (Figura 29).

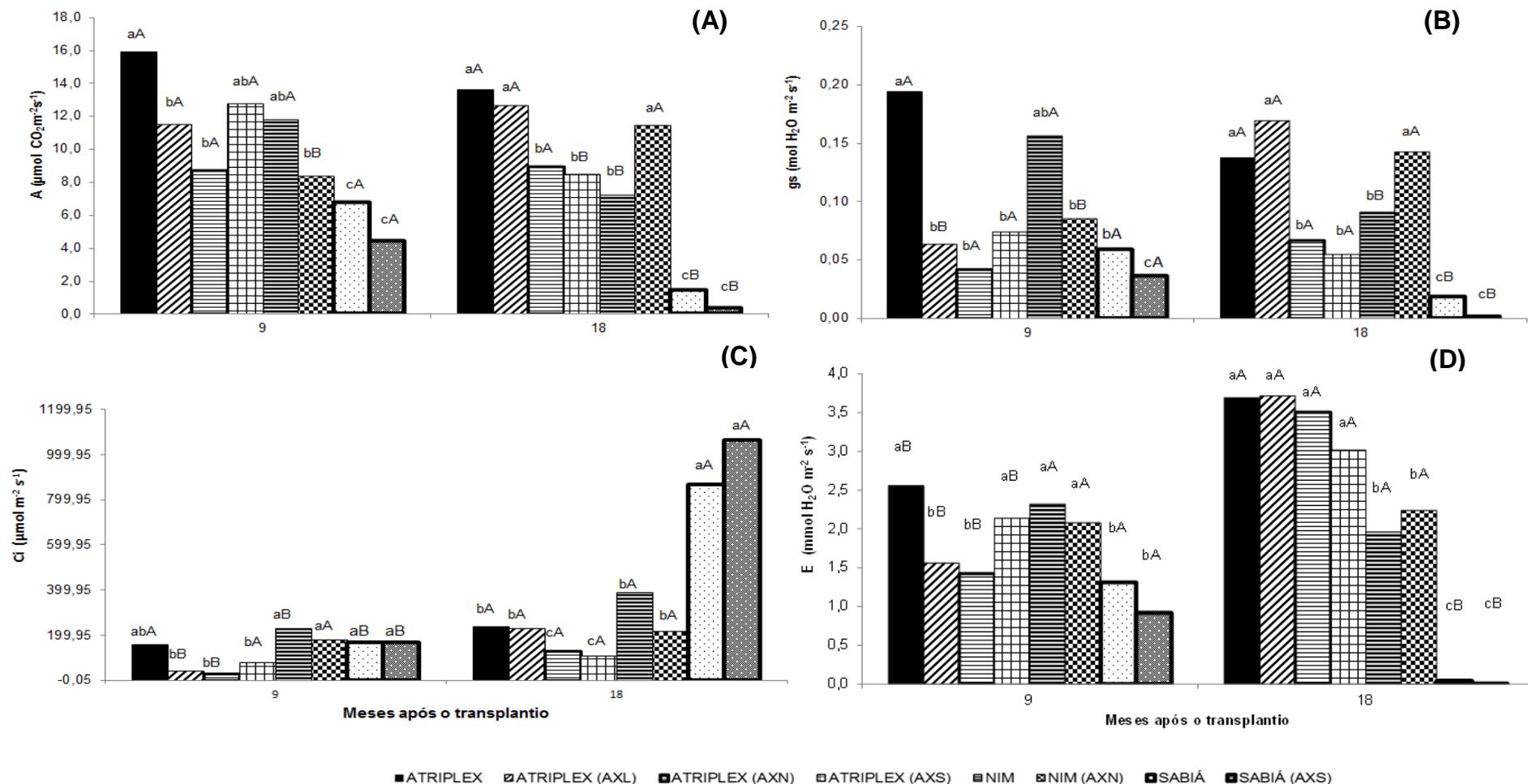


Figura 29. Taxa fotossintética (A), Condutância estomática (B), Concentração interna de CO₂ (C) e transpiração (D) em plantas de atriplex, nim e sabiá, em cultivo isolado e consorciado, aos 9 e 18 meses após o transplântio. Letras minúsculas iguais comparam médias que não diferem estatisticamente entre os tratamentos; e as maiúsculas entre os tempos de cultivo; ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Atriplex (AxL) – Planta de atriplex do consórcio com leucena; Atriplex (AxN) – Planta de atriplex do consórcio com nim; Nim (AxN) – Planta de nim do consórcio com atriplex; Atriplex (AxS) – Planta de atriplex do consórcio com sabiá; Sabiá (AxS) – Planta de sabiá do consórcio com atriplex.

A espécie com os maiores valores da taxa de fotossíntese foi a atriplex, atingindo média máxima de assimilação de CO₂ igual a 15,92 μmol m⁻² s⁻¹, seguida do nim, com o valor de 11,77 μmol m⁻² s⁻¹. Diferindo estatisticamente (p < 0,05) do sabiá, com fotossíntese líquida média igual a 0,30 μmol m⁻² s⁻¹.

O melhor desempenho das plantas de atriplex está associado ao fato de espécies com mecanismos fotossintéticos C4 serem mais adaptadas a climas quentes, secos e com alta intensidade de luz, pois possuem uma via de fixação de carbono adicional e anatomia característica (Ashraf & Harris, 2013). Particularmente, *A. nummularia* tem a capacidade de manter altas taxas fotossintéticas com a manutenção de baixas concentrações de CO₂ interno (Figura 29C), com o fechamento de estômatos quase total (Parida & Das, 2005), e conseqüente minimização da transpiração (Figura 29D), devido ao seu mecanismo de enriquecimento de CO₂ muito eficiente nos locais de carboxilação nas células da bainha, acompanhado por uma fixação de CO₂ eficiente e ausência de fotorrespiração (Geissler et al, 2015).

A tolerância do aparato fotossintético de plantas halófitas a condições salinas é promovida por adaptações bioquímicas. De suma importância é a habilidade de minimizar a perda de água através da redução da condutância estomática, mantendo, assim, o ganho de carbono fotossintético. Adicionalmente, a capacidade de suportar o estresse oxidativo também é um componente fundamental do conjunto de traços que conferem tolerância de plantas halófitas a condições salinas (Jenks & Hasegawa, 2008).

O padrão observado de resposta da atriplex à salinidade pode ser apoiado por estudos recentes. Redondo Gomez et al. (2007), trabalhando com *Atriplex portulacoides*, relataram alta taxa fotossintética líquida quando as plantas foram cultivadas em ambiente com concentração de 200 mol m⁻³ de NaCl. Mais recentemente, Geissler et al. (2015) demonstraram que a *A. nummularia* tem um nível distintamente mais elevado de assimilação de CO₂ em comparação a *Chenopodium quinoa*. Estes autores observaram que houve declínio na taxa de fotossíntese líquida, condutância estomática e transpiração da *C. quinoa* quando cultivadas sob concentração de 300 mmol dm⁻³ de NaCl, enquanto a *A. nummularia* manteve-se em pleno desenvolvimento mesmo quando cultivada em ambiente com 750 mmol dm⁻³ de NaCl.

Reduções na assimilação do carbono (A) verificadas nas plantas de sabiá aos 18 meses podem estar associadas à elevação da salinidade (Figura 7).

Esta, por sua vez, induz o estresse osmótico, o qual, segundo Medrano et al. (2002) e Parry et al. (2002), promovem a redução do metabolismo do mesófilo, por diminuir a ativação e a atividade da Rubisco carboxilase. Além disso, a menor eficiência da Rubisco pode ser causada por uma resistência maior do mesófilo devido ao fechamento estomático, restringindo a absorção de CO₂ nos cloroplastos e aumentando a ação oxigenase de Rubisco e, em consequência, a fotorrespiração.

De um modo geral foi observado um padrão nas respostas de condutância estomática (gs) nas plantas de atriplex e nim, sendo apresentada uma alternância nos valores de gs entre os períodos de avaliação (Figura 29B). Essas espécies de plantas já tinham um baixo potencial hídrico na madrugada (Ψ_w) (Tabela 8), e pareciam capazes de reduzir ainda mais, já que não havia nenhuma indicação de fechamento estomático ao meio-dia. Nestas espécies, provavelmente a manutenção da absorção de água durante o dia ou a recuperação do *status* da água na folha durante a noite pode ser suficiente para manter os estômatos abertos durante todo o dia (Dombroski et al., 2011).

Na fase inicial do experimento (9 MAT), onde foram observadas as maiores precipitações, as plantas se desenvolveram sob condições menos salinas, com conseqüente menor choque osmótico. Nesse período, provavelmente, a abertura estomática foi estimulada, possibilitando maiores valores de condutância estomática (gs), observados entre as épocas de avaliação (Figura 29B).

Na fase posterior do experimento, é possível que a condutância estomática tenha sido reduzida em consequência da salinidade do meio externo (Figura 29B). E essas alterações na g_s podem explicar, parcialmente, o que houve com a taxa de assimilação fotossintética (Figura 29A). Mostrando correlação altamente significativa ao nível 0,01 de probabilidade nas plantas de atriplex ($R = 0,7930$), nim ($R = 0,9663$) e sabiá ($R = 0,9934$). É importante destacar que as reduções nas taxas fotossintéticas pelo estresse salino podem ser devidas ao fechamento parcial dos estômatos, associado ao efeito osmótico da salinidade (Neves et al., 2009; Souza et al., 2012). O fechamento dos estômatos como tentativa de manter o conteúdo hídrico favorável nos tecidos por maior tempo possível, é uma das primeiras linhas de defesa contra a dessecação (Larcher, 2000).

Dentre as espécies testadas, o sabiá foi a mais atingida pelas alterações ambientais, com fechamento dos estômatos quase completo quando as concentrações de sais no solo aumentaram (18 MAT) (Figura 5A). A condutância estomática foi reduzida em 93,14 e 78,81% para as plantas de sabiá manejadas em consórcio (Atr x S) e em cultivo isolado, respectivamente (Figura 31 B). Isso pode estar associado à diminuição do potencial hídrico foliar, em função da baixa umidade do solo, resultado da redução da turgescência das células guardas, provocando o fechamento estomático (Grassi & Magnani, 2005).

Segundo Gonçalves et al. (2009), a redução na taxa de gs, com o aumento do déficit hídrico, implica na diminuição da atividade fotoquímica, assim, a fotoinibição eventualmente ocorre sob condições de seca mais severa, com fechamento estomático quase completo, fato ocorrido neste trabalho.

Alterações no comportamento estomático em plantas de sabiá em função da limitação na disponibilidade de água do solo foram observadas por Dombrowski et al. (2011) em condições de campo, os autores indicam que a estratégia que a espécie estudada possui para lidar com o déficit hídrico está associada a um gs máximo no início da manhã com fechamento dos estômatos ao longo do dia, para manutenção das reservas de água da planta, que, segundo os autores, provavelmente, eram muito baixas e não estavam sendo reabastecidas para sustentar a transpiração durante o dia. Isto pode estar relacionado com sistema radicular muito superficial das plantas de sabiá.

Nesse mesmo experimento, os pesquisadores relacionaram a abertura estomática ao potencial de água na folha, indicando que nas plantas de sabiá os menores valores de Ψ_w são encontrados entre o período da manhã (7:30 h) e o meio-dia, sugerindo a influência desta variável sobre as taxas de transpiração.

As medições do potencial hídrico nas plantas de sabiá no presente estudo foram realizadas na madrugada (3:00 a 5:00 h) e foram observados valores substancialmente superiores aos encontrados por Dombrowski et al. (2011) (Tabela 8). Estabelecendo-se uma relação com a afirmação desses autores, pode-se inferir que a abertura estomática do sabiá deve concentrar-se no período entre a noite e a antemanhã, sugerindo-se, portanto, que esse comportamento de redução da gs possa ter sido induzido por uma mudança no metabolismo do carbono. Isso está de acordo com Taiz & Zeiger (2010), ao

afirmarem que o estresse osmótico induz o metabolismo CAM em algumas plantas, um mecanismo adaptado pelas plantas, no qual os estômatos abrem à noite e fecham durante o dia, como estratégia alternativa de adaptação a condições salinas.

Tabela 8. Potencial hídrico foliar em plantas de atriplex, nim e sabiá, em cultivo isolado e consorciado aos 18 meses após o transplântio

Espécie	Potencial hídrico (Ψ_w)
	Mpa
Atriplex	- 2,28 A
Atriplex (Atr x L)	- 2,19 A
Atriplex (Atr x N)	- 2,14 A
Atriplex (Atr x S)	- 2,09 A
Nim	- 1,07 B
Nim (Atr x N)	- 1,05 B
Sabiá	- 0,48 C
Sabiá (Atr x N)	- 0,51 C

Letras iguais comparam médias que não diferem estatisticamente entre os tratamentos; ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Centritto et al. (2003) relataram que o estresse salino afeta a condutância estomática, de modo que a acumulação de CO₂ nos espaços intercelulares poderia indicar o declínio fotossintético. De acordo com Grassi & Magnani (2005), o déficit hídrico pode afetar a fotossíntese tanto por efeitos no comportamento dos estômatos como não estomático ou metabólico.

Foi observada uma relação linear entre os padrões de respostas das taxas de gs e as taxas transpiratórias (E) das plantas. No entanto, o padrão transpiratório foi distinto entre as espécies; sendo observado um ligeiro aumento da transpiração nas plantas de atriplex e nim, entre a época chuvosa e seca, sugerindo a influência do clima nas respostas adaptativas das plantas.

Resultados contrastantes foram observados por Silva et al. (2011), que constataram que plantas cultivadas em ambientes áridos e semiáridos, quando expostas a longos períodos de déficit de água no solo reduzem a taxa fotossintética associada com fechamento estomático, devido a mudanças no *status* de água da folha. O que implica supor que a principal prioridade da

atriplex e do nim não parece ser a redução de perda de água, mas a maximização da concentração interna (C_i) e da fixação de CO_2 líquido.

Diferentemente, nas plantas de sabiá foi constatada uma drástica redução na transpiração entre as épocas de avaliação ($p < 0,05$). Isso pode indicar um ajustamento dessa espécie no intuito de contornar as condições estressantes a que foi submetida (Figura 29D). Segundo comentários de Sousa et al. (2012) e Geissler et al. (2015), plantas que crescem em solos salinos são forçadas a minimizar a perda de água porque o crescimento depende da capacidade de manter a assimilação líquida de CO_2 e uma baixa transpiração, simultaneamente.

Essa mesma tendência também foi observada por Silva et al. (2003), avaliando a mesma espécie vegetal sob estresse hídrico, que também verificaram reduções na condutância estomática (g_s) e na taxa de transpiração (E). Evidencia-se, dessa forma, uma estratégia de economia de água durante o período crítico, com o fechamento gradual dos estômatos e a manutenção de menores taxas de transpiração, em detrimento da absorção de CO_2 . Larcher (2006) caracteriza a diminuição da transpiração como um mecanismo para contornar a supressão do fluxo interno de água na folha, quando este se torna insuficiente para a manutenção da turgescência foliar. Tal fato observado no presente trabalho sugere que houve redução do fluxo de água na planta, devido, provavelmente, à elevada concentração de sais na zona radicular.

Também foi observado que as plantas de sabiá tiveram supressão do crescimento das folhas e sua abscisão ao longo do experimento, especialmente no período caracterizado como seco (18 MAT) (Figura 1). Essa resposta é comprovada na literatura por Scalon et al. (2011) e Holzman, (2008), os quais afirmam que esse comportamento é característico em muitas espécies da caatinga como estratégia para minimizar a perda de água.

Durante o estresse salino, uma das adaptações morfológicas desenvolvidas pelas plantas, como forma de sobrevivência, é a abscisão foliar. Em diferentes variedades de citrus, a abscisão foliar e o acúmulo de prolina servem como indicadores de resistência ao estresse salino (Patel et al., 2011), minimizando a toxicidade que os íons provocam na planta (Chartzoulakis, 2005; Gu et al., 2011).

Um cenário contrastante foi observado entre as duas épocas de avaliação com relação às respostas das plantas quanto à concentração interna de CO_2

(Ci) (Figura 29C). Enquanto aos nove meses experimentais os valores de Ci foram estatisticamente semelhantes entre as espécies, distintamente, na segunda avaliação, o padrão da concentração de CO₂ foi discrepante ($P < 0,05$).

Aos 18 MAT as plantas de atriplex e nim tiveram valores de Ci próximos, contudo, nas plantas de sabiá, estes valores foram maiores.

Por outro lado, nas plantas de atriplex e nim, a concentração interna de CO₂ (Ci) teve pouca variação entre as duas avaliações, mantendo-se praticamente constante. Calbo & Moraes (2000) atribuem a manutenção aproximadamente constante do Ci sob baixa disponibilidade hídrica do solo a uma condutância estomática não uniforme ao longo do mesófilo. Adicionalmente, indicando maior habilidade fotossintética dessas duas espécies durante o período seco (Figura 29C).

A elevação dos valores da Ci observadas nas plantas de sabiá evidencia uma relação linear com a condutância estomática, o que parece indicar que o decréscimo da taxa de fotossíntese líquida foi devido ao efeito osmótico sobre a fotossíntese, visto que um alto valor de Ci associado a baixas condutâncias estomáticas indicaria um decréscimo na eficiência de carboxilação (Ashraf & Harris, 2015).

Contudo, existem argumentos que atribuem a fatores não estomáticos a redução da fotossíntese com a elevação da concentração interna de CO₂. Freire et al. (2014) afirmam que valores elevados na Ci no interior das folhas indicam que o CO₂ não está sendo utilizado para a síntese de açúcares pelo processo fotossintético.

Neste trabalho, os resultados podem revelar que as reduções das taxas de fotossíntese nas plantas de sabiá ocorreram concomitantemente ao aumento da Ci e à diminuição da condutância estomática.

Adicionalmente, a relação Ci/Ca representada pela concentração interna e externa de CO₂ na folha, a qual mantém uma relação inversamente proporcional à eficiência da fotossíntese, ou seja, quanto menor essa relação, maior a taxa fotossintética (Kaschuk et al., 2012). Os resultados desta relação são apresentados na Figura 30A e assemelham-se aos das taxas de Ci.

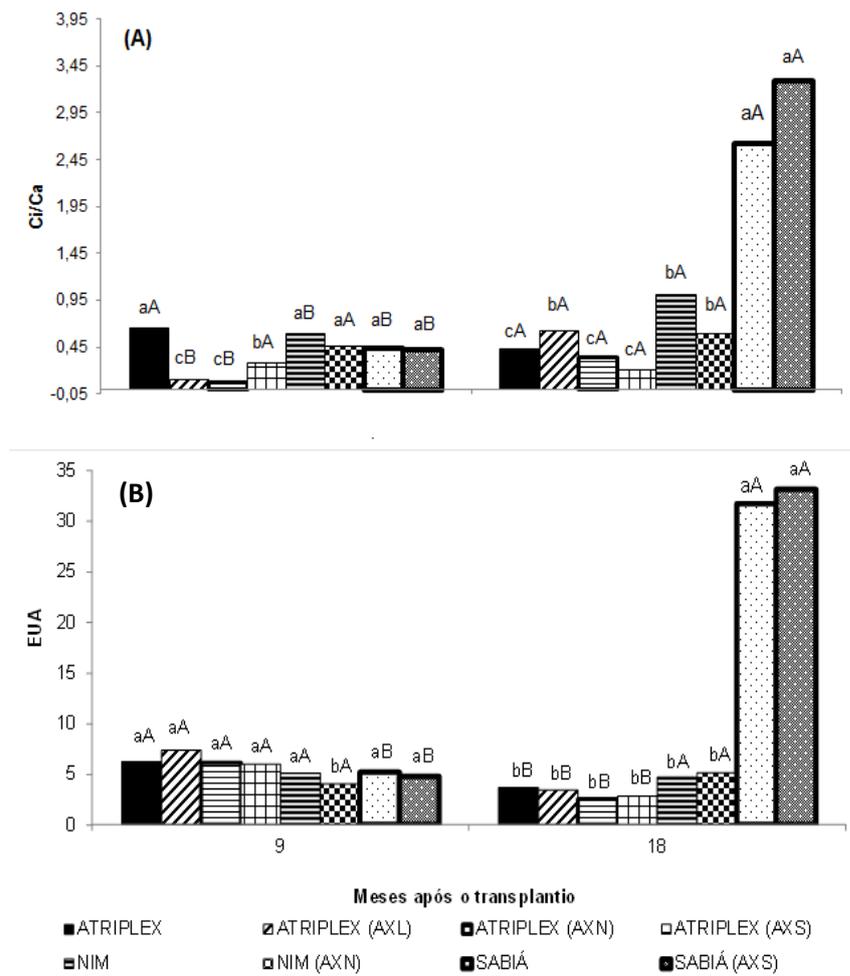


Figura 30. Concentração interna e externa de CO₂ - Ci/Ca (A) e eficiência do uso da água – EUA (B) em plantas de atriplex, nim e sabiá, em cultivo isolado e consorciado, aos 9 e 18 meses após o transplântio. Letras minúsculas iguais comparam médias que não diferem estatisticamente entre os tratamentos; e as maiúsculas entre os tempos de cultivo; ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Atriplex (AxL) – Planta de atriplex do consórcio com leucena; Atriplex (AxN) – Planta de atriplex do consórcio com nim; Nim (AxN) – Planta de nim do consórcio com atriplex; Atriplex (AxS) – Planta de atriplex do consórcio com sabiá; Sabiá (AxS) – Planta de sabiá do consórcio com atriplex.

Considerando-se que a concentração de CO₂ externa (Ca) mantém-se constante, o aumento na relação Ci/Ca deve-se apenas a variações na concentração interna (Ci). Se Ci está aumentando significa que o CO₂ que está chegando às células do mesófilo não está sendo fixado na fase carboxilativa, possivelmente por danos em sua estrutura, reduzindo então a taxa fotossintética (Meloni et al., 2003).

Mais uma vez, nas plantas de sabiá foram observados os maiores valores da relação C_i/C_a , diferenciando-se estatisticamente das demais espécies. Na segunda medição (18 meses), foram verificadas taxas de C_i/C_a significativamente elevadas, sendo registrados aumentos de 87,0% (atriplex x sabiá) e 83,0% (sabiá), o que pode sugerir a influência do estresse salino e hídrico nas plantas, traduzindo-se pela supressão das taxas de fotossíntese.

Os valores de eficiência do uso da água (EUA) das plantas estudadas foram semelhantes entre si ($p < 0,05$), na primeira avaliação. Ao passo que, ao final do experimento, as diferenças no comportamento das espécies começam a ser reveladas. Para as plantas de atriplex e nim foram registrados reduções nos valores da EUA. Por outro lado, nas plantas de sabiá foi observado que a EUA foi estimulada ao longo do tempo (Figura 30B).

Plantas C4 normalmente têm maior eficiência no uso da água do que plantas C3. No entanto, neste estudo, a similaridade aos 9 MAT e a discrepância observada no sabiá em relação as demais espécies, aos 18 MAT, pode sugerir uma habilidade dessa espécie em tolerar ambientes sob concentrações de sais e restrição hídrica prolongada. A analogia desse aumento na eficiência do uso da água com a condutância estomática e a transpiração menores, indica que essa espécie, por ser nativa da Caatinga, possui mecanismos adaptativos, no sentido de diminuir as perdas de água, quando sob condição de estresse salino.

Glenn et al. (2012) observaram que a salinidade teve um efeito importante sobre a eficiência no uso da água para três espécies do gênero *Atriplex*, com aumento nas taxas de 3 a 4 vezes com as plantas cultivadas com soluções salinas em comparação ao controle com água destilada.

A forma como a taxa de assimilação de CO_2 (A) relaciona-se com a transpiração tem importância ecológica, pois se a assimilação de CO_2 e a condutância variam proporcionalmente, numa relação linear, é possível que a concentração interna de CO_2 e a eficiência do uso da água se mantenham constantes, no sentido de otimização das trocas gasosas (Oliveira et al., 2002).

A supressão nas taxas de transpiração (E) verificadas nas plantas de sabiá coincidiu com a diminuição da fotossíntese líquida (A). No entanto, essas reduções foram proporcionalmente maiores que as observadas nas taxas de

fotossíntese, o que, segundo Hussin et al. (2013), potencializa a eficiência do uso da água (EUA).

É notável que as respostas das plantas ao estresse envolvam uma gama de expressões associadas a fatores como intensidade, duração e taxa de progressão da imposição do estresse (Chaves et al., 2011). Salienta-se que a resposta da planta à seca e à salinidade mobiliza toda a dinâmica metabólica e dá-se por meio de uma série de eventos fisiológicos, celulares e moleculares que ocorre paralelamente e muito rapidamente, no sentido de restabelecer um equilíbrio de desenvolvimento, com conseqüente cenário de tolerância e sobrevivência das plantas (Flowers et al., 2015).

Foram observadas diferentes respostas das espécies quanto às trocas gasosas e estas diferiram, também, com o período da leitura. Isso pode ter ocorrido em função das condições hídricas nestes períodos, conforme os dados climatológicos (Figura 1), incrementando a salinidade em períodos de menor precipitação pluvial. E indica, também, a capacidade de adaptação das mesmas às condições de estresse, seja hídrico, salino, ou ambos.

5. CONCLUSÕES

- O cultivo de plantas de atriplex, leucena e nim, isoladamente ou em consórcio promoveram melhoria na qualidade química do solo degradado pela salinidade e sodicidade;
- O cultivo de plantas de atriplex, leucena, nim e sabiá é favorável à qualidade física do solo, com o incremento na condutividade hidráulica, diminuição do teor de argila dispersa em água e melhorias na estrutura do solo;
- As espécies *Atriplex nummularia* Lindl, *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Azadirachta indica* A. Juss. e *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth têm potencial fitorremediador de solos afetados por sais;
- A *Atriplex nummularia* Lindl caracterizou-se como planta hiperacumuladora de sódio e cloro, com potencial de uso na fitoextração destes elementos em solos afetados por sais;
- É possível utilizar associação de plantas adaptadas ao semiárido na fitorremediação de solos afetados por sais e revegetação de áreas degradadas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARIE, S.; SHIMODA, T.; SHIMIZU, Y.; BAUMANN, K.; SUNAGAWA, H.; KONDO, A.; UENO, O.; NAKAHARA, T.; NOSE, A.; CUSHMAN, J. C. Salt tolerance, salt accumulation and ionic homeostasis in an epidermal bladder-cell-less mutant of the common ice plant *Mesembryanthemum crystallinum*. *Journal of Experimental Botany*, v. 58, n. 8, p. 1957-1967, 2007.

AGUIAR, M. I. Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais. Viçosa: UFV, 2008. 91p. (Dissertação de Mestrado).

AKHTER, J.; MAHMOOD, K.; MALIK, K. A.; AHMED, S.; MURRAY, R. Amelioration of a saline sodic soil through cultivation of a salt tolerant grass *Leptochloa fusca*. *Environmental Conservation*, v. 30, p. 168–174, 2003.

AKRAM, N. A.; ASHRAF, M. Improvement in growth, chlorophyll pigments and photosynthetic performance in salt-stressed plants of sunflower (*Helianthus annuus* L.) by foliar application of 5-aminolevulinic acid. *Agrochimica*, v. 55, p. 94-104, 2011.

AMIRA M. S.; ABDUL, Q. Effect of salt stress on plant growth and metabolism of bean plant *Vicia faba* (L.). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, v. 10, p. 7-15, 2011.

ANNING, A. K.; KORSAH, P. E.; ADDO-FORDJOUR, P. Phytoremediation of Watewater with *Limnocharis 349 Flava*, *Thalia Genuiculata* and *Typha Latifolia* in constructed wetlands. *Int J Phytoremediat*, v.15, p.452–464, 2013.

AOUISSAT, M.; WALKER, D. J.; HCINI, K.; BELKHODJA, M.; Correal, E. Osmolyte concentrations in *Atriplex halimus* L. and *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt. adapted to salinity and low temperature (Chenopodiaceae). *Anales de Biología*, v. 33, p. 117-126, 2011.

APSE, M. P.; BLUMWALD, E. Na⁺ transport in plants. *FEBS Letters*, v. 586. p. 2247–2254, 2007.

ARÉVALO-GARDINI, E.; CANTO, M.; ALEGRE, J.; OSCAR LOLI, O.; JULCA, A.; VIRUPAX BALIGAR, V. Changes in Soil Physical and Chemical Properties in Long Term Improved Natural and Traditional Agroforestry Management

Systems of Cacao Genotypes in Peruvian Amazon. Plos One, v. 16, p. 1-29, 2015.

ARNON, A. D. I.; STOUTS, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. Plant Physiology v.14, p.371-375, 1939.

ARZANI, A. Improving salinity tolerance in crop plants: a biotechnological view. Vitro Cell Developmental Biology Plant, v. 44, n. 5, p. 373-383, 2008.

ASHRAF, M. Biotechnological approach of improving plant salt tolerance using antioxidants as markers. Biotech. Adv., v. 27, p. 84-93. 2009.

ASHRAF, M.; ATHAR H. R., Harris P. J. C., Kwon T. R. Some prospective strategies for improving crop salt tolerance. Adv Agron, v. 97, p. 45–110. 2008.

ASHRAF, M.; HARRIS, P. J. C. Photosynthesis under stressful environments: An overview. Photosynthetica. v. 51, p. 163-190, 2013.

ASHRAF, M.; HARRIS, P. J. C. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. Plant Science, v. 166, p. 3-16, 2004.

ASLAM, R.; BOSTAN, N.; NABGHA-E-AMEN; MARIA, M.; SAFDAR, W. A critical review on halophytes: salt tolerant plants. Journal of Medicinal Plants Research, v. 5, n. 33, p. 7108-7118, 2011.

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

AZEVEDO-NETO, A. D. D.; PRISCO, J. T.; ENEAS-FILHO, J.; ABREU, C. E. B. GOMES-FILHO, E. Effect of salt stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of salt-tolerant and salt-sensitive maize genotypes. Environmental and Experimental Botany, v. 56, p. 87-94, 2006.

BATES, L. S; WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant Soil, v. 39, p.205-207, 1973.

BAZIHIZINA, N.; BARRETT-LENNARD, E. G.; COLMER, T. D. Plant responses to heterogeneous salinity: Growth of the halophyte *Atriplex nummularia* is

determined by the root-weighted mean salinity of the root zone. *Journal of Experimental Botany*, v.63, p.6347-6358, 2012.

BEN HASSINE, A.; GHANEM, M. E.; BOUZID, S.; LUTTS, S. An inland and a coastal population of the Mediterranean xero-halophyte species *Atriplex halimus* L. differ in their ability to accumulate proline and glycinebetaine in response to salinity and water stress. *Journal of Experimental Botany*, v. 59:, p.1315–1326, 2008.

BEN REJEB, K.; ABDELLY, C.; SAVOURE, A. How reactive oxygen species and proline faces stress together. *Plant Physiology Biochemistry*. v.80, p. 278–284, 2014.

BEN-GAL, A., BOROCHOV-NEORI, H., YERMIYAHU, U., SHANI, U. Is osmotic potential a more appropriate property than electrical conductivity for evaluating whole-plant response to salinity? *Environmental and Experimental Botany*, v. 65, p. 232–237, 2009.

BENINCASA, M.M.P. Análise do crescimento de plantas. Jaboticabal: FUNEP, 1988. 42p.

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, v. 72, p. 248-254. 1976.

BRASIL, R. B. Aspectos botânico, usos tradicionais e potencialidades de *Azadirachta indica* (Neem). *Enciclopédia biosfera*, v.9, p. 32-52, 2013.

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

CALBO, M. E. R.; MORAES, J. A. P. V. Efeitos da deficiência de água em plantas de *Euterpe oleracea* (açai). *Revista Brasileira de Botânica*, v. 23, n. 3, p. 225-230, 2000.

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

- CARVALHO, P. E. R. Sabiá *Mimosa caesalpinifolia*. Embrapa Florestas, 2007. (Circular técnica).
- CENTRITTO, M.; LORETO, F.; CHARTZOULAKIS, K. The use of low [CO₂] to estimate diffusional and non-diffusional limitations of photosynthetic capacity of salt-stressed olive saplings. *Plant, Cell and Environment*, v. 26, p. 585–594, 2003.
- CHARTZOULAKIS, K. S. Salinity and olive: growth, salt tolerance, photosynthesis and yield. *Agricultural Water Management*, v. 78, p. 108-121, 2005.
- CHAUM, S.; C. KIRDMANEE. Effect of salt stress on proline accumulation, photosynthetic ability and growth characters in two maize cultivars. *Pak. J. Bot.*, 41: 87-98. 2009.
- CHAVES FILHO, J. T. & STACCIARINI-SERAPHIN, E. Alteração no potencial osmótico e teor de carboidratos solúveis em plantas jovens de lobeira (*Solanum lycocarpum* St.-Hil.) em resposta ao estresse hídrico. *Revista Brasileira de Botânica* 24:199-204, 2001.
- CHAVES, M. M.; COSTA, J. M.; SAIBO, N. J. M. Recent Advances in Photosynthesis Under Drought and Salinity. *Advances in Botanical Research*, v. 57, p. 49-104, 2011.
- CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*. v. 103, p. 551–560, 2009.
- CHEN, J.; YAN, J.; QIAN, Y.; JIANG, Y.; ZHANG, T.; GUO, H.; GUO, A.; LIU, J. Growth responses and ion regulation of four warm season turfgrasses to long-term salinity stress, *Scientia Horticulturae*, v. 122, p. 620-625, 2009.
- CHEN, S.H.; GUO, S. L.; WANG Z. L.; ZHAO J. Q.; ZHAO Y. X.; ZHANG H. Expressed sequence tags from the halophyte *Limonium sinense*. *DNA Sequence*. v. 18. p. 61–67, 2007.
- CHINNUSAMY, V.; JAGENDORF, A.; ZHU, J. K. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science*, 45, 437-448, 2005.

COLMER, T. D.; MUNNS, R.; FLOWERS, T. J. Improving salt tolerance of wheat and barley: future prospects. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, v. 45, n. 11, p. 1425-1443, 2005.

DANG, Y. P.; DALAL, R. C; BUCK, S. R. Diagnosis, extent, impacts, and management of subsoil constraints in the northern grains cropping region of Australia. *Australian Journal of Soil Research*, v. 48, p. 105–119, 2010.

DAVENPORT, R.; JAMES, R.; ZAKRISSON-PLOGANDER, A.; TESTER, M.; MUNNS, R. Control of Sodium Transport in Durum Wheat. *Plant Physiology*, 137, 807-818, 2005.

DEMIDCHIK, V.; STRALTSOVA, D.; MEDVEDEV, S. S.; POZHVANOV, G. A.; SOKOLIK, A.; YURIN, V. Stress-induced electrolyte leakage: the role of K⁺-permeable channels and involvement in programmed cell death and metabolic adjustment. *Journal of Experimental Botany*, v. 11, p. 1-12, 2014.

DING, F.; CHEN, M.; SUI, N.; WANG, B. Ca²⁺ significantly enhanced development and salt-secretion rate of salt glands of *Limonium bicolor* under NaCl treatment. *South African Journal of Botany*, n. 76, p. 95-101, 2010.

DING, F.; SONG, J.; RUAN, Y.; WANG, B. Comparison of the effects os NaCl and KCl at the roots on seedling growth, cell death and the size, frequency and secretion rate of salt glands in leaves of *Limonium sinense*. *Acta Physiol Plant*, v. 39, p. 343-350, 2009.

DOMBROSKI, J. L. D.; PRAXEDES, S. C.; FREITAS, R. M. O.; PONTES, F. M. Water relations of Caatinga trees in the dry season. *South Afr. J. Bot.*, v. 77, p. 430-434, 2011.

DRECHSEL, P.; ZECH, W. Foliar nutrient levels of broad-leaved tropical trees: A tabular review. *Plant and Soil*, v.131, p.29-46, 1991.

DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, v. 28, p. 350-356. 1956, 2004.

DUBOIS, M.; GILLES, K.A.; HAMILTON, J.K.; REBERS, P.A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, v.28, p.350-356, 1956.

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

EPSTEIN, E.; NORLYN, J.D.; RUSH, D.W.; KINGSBURY, R.; KELLEY, D. B.; WRANA, A. F. Saline culture of crops: a genetic approach. *Science* 210, p. 399-404, 1980.

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

FAES, P.; DELEU, C.; AINOUCHE, A.; LE CAHEREC, F.; MONTES, E.; CLOUET, V. Molecular evolution and transcriptional regulation of the oil seed rape proline dehydrogenase genes suggest distinct roles of proline catabolism during development. *Plant*, v. 241, p.403–419, 2015.

FAO. Crops and drops: making the best use of water for agriculture. Roma 2002. 22p.

FICHMAN, Y.; GERDES, S.Y.; KOVACS, H.; SZABADOS, L.; ZILBERSTEIN, A.; CSONKA, L. N. Evolution of proline biosynthesis: enzymology, bioinformatics, genetics, and transcriptional regulation. *Biological Reviews Cambridge Philosophical Society*, v. 90, p. 65-99, 2015.

FLEXAS, J.; BARON, M.; BOTA, J.; DUCRUET, J. M.; GALLE, A., GALMES, J.; JIMENEZ, M.; POU, A.; RIBAS-CARBO, M.; SAJNANI, C.; TOMAS, M.; MEDRANO, H. Photosynthesis limitations during water stress acclimation and recovery in the drought-adapted *Vitis* hybrid Richter-110 (*V-berlandieri* x *V-rupes-tris*). *Journal of Experimental Botany*, v.60, p. 2361–2377, 2009.

FLEXAS, J.; RIBAS-CARBO, M.; DIAZ-ESPEJO, A.; GALMES, J.; MEDRANO, H. Mesophyll conductance to CO₂: Current knowledge and future prospects. *Plant, Cell and Environment*, v. 31, p. 602–621, 2008.

FLOWERS, T. J. Improving crop salt tolerance. *Journal of Experimental Botany*, v. 55, p.307-319, 2004.

FLOWERS, T. J.; COLMER T. D. Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*. v. 179. p. 945–963, 2008.

FLOWERS, T. J.; GAUR, P.M.; GOWDA, C. L. L. Salt sensitivity in chickpea. *Plant, Cell and Environment*, v. 33, p. 490–509, 2010.

FLOWERS, T. J.; MUNNS, R.; COLMER, T. D. Sodium chloride toxicity and the cellular basis of salt tolerance in halophytes. *Annals of Botany*, v. 115, p. 419–431, 2015.

FLOWERS, T. J.; YEO, A.R. Breeding for salinity resistance in crop Plants - where next? *Australian Journal of Plant Physiology*, v. 22, p. 875-884, 1995.

FREIRE, A. L. de O.; FILHO, G. M. de S.; MIRANDA, J. R. P. de; SOUTO, P. C.; ARAÚJO, L. V. C. de. Crescimento e nutrição mineral do nim (*Azadirachta indica* A. Juss.) e cinamomo (*Melia azedarach* Linn.) submetidos à salinidade. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 207-215, 2010a.

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

FREIRE, A. L. O.; RODRIGUES, T. J. D.; MIRANDA, J. R. P. de. Fixação biológica do nitrogênio e crescimento de plantas de Leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.) sob salinidade. *Revista Caatinga*, v. 23, n. 1, p. 90-96, 2010b.

FREIRE, J. L. O. de; DIAS, T. J.; CAVALCANTE, L. F.; FERNANDES, P. D.; LIMA NETO, A. J. de. Rendimento quântico e trocas gasosas em maracujazeiro amarelo sob salinidade hídrica, biofertilização e cobertura morta. *Revista Ciência Agronômica*, v. 45, n. 1, p. 82-91, 2014.

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. 1017p.

GARCÍA, M.; JÁUREGUI, D. Efecto de la salinización con NaCl o Na₂SO₄ sobre la anatomía foliar en dos genotipos de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) con tolerancia salina diferencial. *Ernstia*, v. 18, n. 1, p. 89-105, 2008.

GARCÍA, M.; JÁUREGUI, D.; MEDINA, E. Adaptaciones anatómicas foliares en especies de agiospermas que crecen en la zona costera del Estado Falcón (Venezuela). *Acta Botanica Venezuela*, v. 31, n. 1, p. 291-306, 2008.

- GARZÓN, P.; GARCÍA, M. Effect of NaCl stress on root and leaf anatomy in two cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) genotypes. *Bioagro*, v. 23, p. 153-160, 2011.
- GEISLER, N.; HUSSIN, S.; EL-FAR, M. M. M.; KOYRO, H. Elevated atmospheric CO₂ concentration leads to different salt resistance mechanisms in a C3 (*Chenopodium quinoa*) and a C4 (*Atriplex nummularia*) halophyte. *Environmental and Experimental Botany*. v. 118, p. 67–77, 2015.
- GHARAIBEH, M. A.; ELTAIF, N. I.; ALBALASMEH, A. A. Reclamation of Highly calcareous saline sodic soil using *Atriplex Halimus* and by-product Gypsum. *Journal International Phytoremediation*, v.9, p.873–883, 2011.
- GHARAIBEH, M. A.; ELTAIF, N. I.; ALBALASMEH, A. A. Reclamation of Highly calcareous saline sodic soil Using *Atriplex Halimus* and by-product Gypsum. *International Journal of Phytoremediation*, v.9, p.873–883, 2011.
- GLENN, E. P.; BROWN, J. J.; BLUMWALD, E. Salt tolerance and crop potential of halophytes. *Crit Rev Plant Science*, v. 18, p.227-255, 1999.
- GLENN, E. P.; MCKEON, C. ,GERHAR, T. V, NAGLER, P. L.; JORDAN, F; ARTIOLA, J. Deficit irrigation of a landscape halophyte for reuse of saline waste water in a desert city. *Landscape Urban Plan*, v. 89, p. 57–64, 2009.
- GLENN, E. P.; NELSON, S. G.; AMBROSE, B.; MARTINEZ, R.; SOLIZ, D.; PABENDINSKAS, V.; HULTINE, K. Comparison of salinity tolerance of three *Atriplex* spp. in well-watered and drying soils. *Environmental and Experimental Botany*, v.83, p.62-72, 2012.
- GONÇALVES, I. V. C.; FREIRE, M. B. G. dos S.; SANTOS, M. A. dos; SOUZA, E. R. de; FREIRE, F. J. Alterações químicas de um Neossolo Flúvico irrigado com águas salinas. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 3, p. 589-596, 2011.
- GONÇALVES, J. F. de C.; SILVA, C. E. M. da; GUIMARÃES, D. G. Fotossíntese e potencial hídrico foliar de plantas jovens de andiroba submetidas à deficiência hídrica e à reidratação. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.44, n.1, p.8-14, 2009.

GRASSI, G.; MAGNANI, F. Stomatal, mesophyll conductance and biochemical limitations to photosynthesis as affected by drought and leaf ontogeny in ash and oak trees. *Plant, Cell and Environment*, v. 28, p.834–849, 2005.

GU, D.; GUO, Z.; LI, Y.; YANG, Q.; KE, X.; ZHUANG, M.; LI, Y.; CHE, S. Seasonal variations in salt tolerance of *Oligostachyum lubricum*, *Acta Ecologica Sinica*, v. 31, p, 2932-2939, 2011.

HAN, L. P.; WANG, W. H.; ENEJI, A. E.; LIU, J. Phytoremediating coastal saline soils with oats: accumulation and distribution of sodium, potassium, and chloride ions in plant organs. *Journal of Cleaner Production*, v. 90, p. 73-81, 2015.

HASANUZZAMAN, M.; KAMRUN NAHAR, ALAM, M.; BHOWMIK, P. C.; HOSSAIN, A.; RAHMAN, M. M.; PRASAD, M. N. V.; OZTURK, M.; FUJITA, M. Potential Use of Halophytes to Remediate Saline Soils. *Biomed Research International*, 2014.

HAYAT, S.; HAYAT, Q.; ALYEMENI, M. N.; WANI, A. S.; PICHTEL, J. AHMAD, A. Role of proline under changing environments: A review. *Plant Signaling & Behavior*. v. 7, n.11, p. 1456-1466, 2012.

HOLANDA, A. C.; SANTOS, R. V.; SOUTO, J. S.; ALVES, A. R. Desenvolvimento inicial de espécies arbóreas em ambientes degradados por sais. *Revista Ciência da Terra*, v. 7, p. 39-50, 2007.

HOLANDA, F. S. R.; MARCIANO, C. R.; PEDROTTI, A.; AGUIAR, J. F. de; SANTOS, V. P. Recuperação de áreas com problemas de salinização. *Informe Agropecuário, Belo Horizonte*, v. 22, n. 210, p. 57-61, 2001.

HUSSIN, S.; GEISSLER, N. & KOYRO, H.-W. Effect of NaCl salinity on *Atriplex nummularia* (L.) with special emphasis on carbon and nitrogen metabolism. *Acta Physiologiae Plantarum*, V.35, n.4, p. 1025-1038, 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL CLIMATE CHANGE – IPCC, 2007. <http://www.ipcc.ch>. Acesso em: 10 de janeiro de 2015.

INTERGOVERNMENTAL PANEL CLIMATE CHANGE – IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (AR5), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Disponível em:

<<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.Uky2INJwrwM>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

JACOBSEN, T., ADAMS, R. M. Salt and silt in ancient Mesopotamian agriculture. *Science*, v. 128, p. 251-1258. 1958.

JAOUDE, R. A.; DATO, G. B.; ANGELIS, P. Photosynthetic and wood anatomical responses of *Tamarix Africana* Poiret to water level reduction after short-term fresh and saline-water flooding. *Ecological Research*, 2012.

JENKS, M. A.; HASEGAWA, P. M. *Plant Abiotic Stress*. John Wiley & Sons, 2008. 288 p.

JESUS, J. M.; DANKO, A. S.; FIÚZA, A.; BORGES, M. T. Phytoremediation of salt-affected soils: a review of processes, applicability, and the impact of climate change. *Environmental Science Pollut Resheart International*, v.22, p.6511-25, 2015.

KABAŁA, K.; JANICKA-RUSSAK, M. Na⁺/H⁺ antiport activity in plasma membrane and tonoplast vesicles isolated from NaCl-treated cucumber roots. *Biologia Plantarum*. V. 56 n. 2. p. 377-382. 2012.

KANNAN, N. D.; KULANDAIVELU, G. Drought induced changes in physiological, biochemical and phytochemical properties of *Withania somnifera* Dun. *Journal Medical Plants Research*. v.5, p.3929-3935, 2011.

KASCHUK, G.; YIN, X.; HUNGRIA, M.; LEFFELAAR, P.A.; GUILLER, K.E. & KUYPER, T. W. Photosynthetic adaptation of soybean due to varying effectiveness of N₂ fixation by two distinct *Bradyrhizobium japonicum* strains. *Environmental and Experimental Botany*, v.76, p.1-6, 2012.

KATIYAR-AGARWAL, S.; GAO, S.; VIVIAN-SMITH, A.; JIN, H. A novel class of bacteria-induced small RNAs in *Arabidopsis*. *Genes & Development*, v. 21, 2007.

KLEIN, V. A. *Física do solo*. UPF, v. 1, 2008. 212 p.

KONG, X.; LUO, Z.; DONG, H.; ENEJI, A. E.; LI, W. Effects of non-uniform root zone salinity on water use, Na⁺ recirculation, and Na⁺ and H⁺ flux in cotton. *Journal of Experimental Botany*, v. 20, p. 1-12, 2011.

KOTAKIS, C.; KYZERIDOU, A.; MANETAS, Y. Photosynthetic electron flow during leaf senescence: evidence for a preferential maintenance of photosystem I activity and increased cyclic electron flow. *Photosynthetica*, v. 52, p.413–420, 2014.

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.

LARCHER, W. *Ecofisiologia Vegetal*. ed RiMa Artes e Textos, São Carlos, 2000. 531 p.

LARCHER, W. *Ecofisiologia Vegetal*. São Carlos: RIMA, 2006. 531p.

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.

LELES, P. S. S.; ABAURRE, G. W.; ALONSO, J. M.; NASCIMENTO, D. F.; LISBOA, A. C. Crescimento de espécies arbóreas sob diferentes espaçamentos em plantio de recomposição florestal. *Scientia florestalis*, v. 39, p. 231-239, 2011.

LIANG, X.; ZHANG, L.; NATARAJAN, S. K.; BECKER, D. F. Proline Mechanisms of Stress Survival. *Antioxid & redox signal*. v. 19, n. 9, p. 998-1011., 2013.

LIMA, G. S.; NOBRE, R. G.; GHEYI, H. R.; SOARES, L. A. A.; LOURENÇO, G. S.; SILVA, S. S. Aspectos de crescimento e produção da mamoneira irrigada com águas salinas e adubação nitrogenada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, p.615–622, 2014.

LIMA, V. M. P.; GERALDO CÉSAR DE OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM; M. E., CURI; N.; EVANGELISTA, A. R. Least limiting water range as indicator of structural quality improvement of a degraded Latosol (Oxisol). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p.71-78, 2012.

LOKHANDE, V. H.; SUPRASANNA, P. Prospects of Halophytes in Understanding and Managing Abiotic Stress Tolerance In: AHMAD, P.

PRASAD, M. N. V. Environmental Adaptations and Stress Tolerance of Plants in the Era of Climate Change. p 29-56, 2012.

LORENZI, H. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 3.ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, v. 1, 2000. 351p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 219p.

MANSOUR, M. M. F.; SALAMA, K. H. A.; ALI, F. Z. M.; HADID, A. F.A. Cell and plant responses to NaCl in Zea mays L. cultivars differing in salt tolerance. Genetic Plant Physiology, v. 31, p. 29-41. 2005.

MARTÍNEZ, J. P., KINET, J. M., BAJJI, M., LUTTS, S. NaCl alleviates polyethylene glycolinduced water stress in the halophyte species *Atriplex halimus* L. Journal of Experimental Botany, v. 56, p. 2421–2431, 2005.

MARTÍNEZ, J. P.; LUTTS, S.; SCHANCK, A.; BAJJI, M.; KINET, J. M. Is osmotic adjustment required for water-stress resistance in the Mediterranean shrub *Atriplex halimus* L.? Journal of Plant Physiology, v.161, p.1041–1051, 2004.

MARTINEZ, M.; PRAMANIK, A.; MOTO-NDJE, S.; MOORE, C. W. Overexpression of genes involved in vesicular trafficking to the vacuole defends against lethal effects of oxidative damage. Cell Molecular Biological. Noisy-le-grand, v. 49, p.1025-35, 2003.

MARTINS, M. O. de; NOGUEIRA, R. J. M. C.; AZEVEDO NETO, A. D. de; SANTOS, MA. G. dos. Crescimento de plantas jovens de Nim-indiano (*Azadirachta indica*) A. Juss. - Meliaceae) sob diferentes regimes hídricos. Revista Árvore, v.34, n.5, p.771-779, 2010.

MATTIOLI, R.; FALASCA, G.; SABATINI, S.; ALTAMURA, M. M.; COSTANTINO, P.; TROVATO, M. The proline biosynthetic genes P5CS1 and P5CS2 play overlapping roles in Arabidopsis flower transition but not in embryo development. Physiologia Plantarum, v. 137, p. 72-85, 2009.

MEDRANO, H.; ESCALONA, J. M.; BOTA, J.; GULÍAS, J.; FLEXAS, J. Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought:

stomatal conductance as a reference parameter. *Annals of Botany, Oxford*, v. 89, n. 4, p. 895-905, 2002.

MELO, H. F DE; SOUZA, E. R. DE, ALMEIDA, B. G. DE; FREIRE, M. B. G. DOS; MAIA, F. E. Growth, biomass production and ions accumulation in *Atriplex nummularia* Lindl grown under abiotic stress. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.20, n.2, p.144–151, 2016.

MELONI, D. A.; OLIVA, M. A.; MARTINEZ, C. A.; CAMBRAIA, J. Photosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress. *Environmental and Experimental Botany*, v. 49, p. 69-76, 2003.

MENDES, B. S. S.; WILLADINO, L.; CUNHA, P.C.; OLIVEIRA FILHO, R.A.; CAMARA, T.R. Mecanismo fisiológicos e bioquímicos do abacaxi ornamental sob estresse salino. *Revista Caatinga, Mossoró*, v.24, n.3, p.71-77, 2011.

MITTAL, S.; KUMARI, N.; SHARMA, V. Differential response of salt stress on *Brassica juncea*: Photosynthetic performance, pigment, proline, D1 and antioxidant enzymes. *Plant Physiol Biochemistry*, v. 54, p.17-26, 2012.

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

MOSSINI, S. A. G.; KEMMELMEIER, C. A árvore Nim (*Azadirachta indica* A. Juss): Múltiplos Usos. *Acta Farm. Bonaerense*, v. 24, p. 139-48, 2005.

MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell and Environment* 25, 239–250., 2002.

MUNNS, R. Genes and salt tolerance: bringing them together. *New phytologist*, v. 167, p. 645–663, 2005.

MUNNS, R., TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Plant Biologic*, v. 59, p. 651–681, 2008.

MUNNS, R.; GILLIHAM, M. Salinity tolerance of crops - what is the cost? *New Phytologist*, v. 208, p. 668-673, 2015.

- NASIR, F. A. Bioreclamation of a saline sodic soil in a semi arid region/Jordan, American-Eurasian. Journal of Agricultural and Environmental Sciences, vol. 5, p. 701–706, 2009.
- NEDJIMI, B. Effects of salinity on growth, membrane permeability and root hydraulic conductivity in three saltbush species. Biochemical Systematics and Ecology, v. 52, p. 4 -13, 2014.
- NEVES, A. L. R. et al. Trocas gasosas e teores de minerais no feijão-de-corda irrigado com água salina em diferentes estádios. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, p.873–881, 2009. (Suplemento).
- NEVES, E. J. M. Importância dos fatores edafoclimáticos para o uso do Nim (*Azadirachta indica* A. Juss) em programas florestais e agroflorestais nas diferentes regiões do Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2004, p.99-107. (Boletim de Pesquisa Florestal).
- NEVES, E. J. M.; CARPANEZZI, A. A. Teores Foliare de Nutrientes em Plantios de Nim nos Estados do Paraná e São Paulo. EMBRAPA, 2006. (Comunicado técnico).
- NEVES, E. J. M.; REISSMANN, C. B.; DEDECEK, R. A.; CARPANEZZI, A. A. Caracterização nutricional do nim em plantios no Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, n.1, p.26–32, 2013.
- NEVES, L. A. S.; SPAT, C. Concentração de clorofila e de prolina em genótipos de arroz submetidos à salinidade. Unimontes científica, v. 15, n. 1, 2013.
- NOGUEIRA, A. R. de A.; SOUZA, G. B. de (Ed.). Manual de laboratório: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005.
- NUNES, J. C.; CAVALCANTE, L. F.; LIMA NETO, A. J. de; REBEQUI, A. M.; BELÍSIA, L. M. T.; GHEYI, H. R. Comportamento de mudas de nim à salinidade da água em solo não salino com biofertilizante. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.16, p.1152–1158, 2012.
- OH, D. H.; LEE, S. Y.; BRESSAN, R. A.; YUN, D.-J.; BOHNERT, H. J. Intracellular consequences of SOS1 deficiency during salt stress. *Journal of Experimental Botany*, 2010.

OH, D. H.; LEIDI, E.; ZHANG, Q.; HWANG, S. M.; LI, Y. Z.; QUINTERO, F. J.; JIANG, X. Y.; D'URZO, M. P.; LEE, S. Y.; ZHAO, Y. X.; BAHK, J. D.; BRESSAN, R. A.; YUN, D. J.; PARDO, J. M.; BOHNERT, H. J. Loss of halophytism by interference with SOS1 expression. *Plant Physiology*, v. 42, 2009.

OLIVEIRA, L. A. A.; BARRETO, L. P.; BEZERRA NETO, E.; SANTOS, M. V. F. dos; COSTA, J. de C. A. Solutos orgânicos em genótipos de sorgo forrageiro sob estresse salino. *Pesquisa agropecuária brasileira*, v.41, n.1, p.31-35, 2006.

OLIVEIRA, M. A. J. DE; BOVI, M. L. A; MACHADO, E. C; ASSIS, M. M. DE; HABERMANN, G; RODRIGUES, J. D. Fotossíntese, condutância estomática e transpiração em pupunheira sob deficiência hídrica. *Scientia Agricola*, v.59, p.59-63, 2002.

OMOTO, E.; TANIGUCHI, M.; MIYAKE, H. Effects of salinity stress on the structure of bundle sheath and mesophyll chloroplasts in NAD-malic enzyme and PCK type C4 plants. *Plant Production Science*. v. 13, p. 169-176, 2010.

PACE, R.; BENINCASA, P.; GHANEM, M. E.; QUINET, M.; LUTTS, S. Germination of untreated and primed seeds in rapeseed (*Brassica Napus* var. *oleifera* Del.) under salinity and low matric potential. *Experimental Agriculture*, v. 48, n. 2, p. 238–251, 2012.

PANDOLFI, C.; MANCUSOA, S.; SHABALAB, S. Physiology of acclimation to salinity stress in pea (*Pisum sativum*). *Environmental and Experimental Botany*. v. 84. p. 44-51. 2012.

PARDO, J. M.; CUBERO, B.; LEIDI, E. O.; QUINTERO, F. J. Alkali cation exchangers: Roles in cellular homeostasis and stress tolerance. *Journal Experimental Botanic*, v.57, p.1181–1199, 2006.

PARIDA, A. K.; DAS, A. B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 60, p. 324-349, 2005.

PARIDA, A. K.; DAS, A. B.; MITTRA, B. Effects of salt on growth, ion accumulation, photosynthesis and leaf anatomy of the mangrove, *Bruguiera parviflora*. *Trees – Structure and Function*, v.18, n.2, p.167-174, 2005.

PARRY, M. A. J.; ANDRALOJC, P. J.; KHAN, S.; PETER J. LEA, P. J.; ALFRED J. KEYS, A. J. Rubisco activity: effects of drought stress. *Annals of Botany*, v, 89, n. 3, p. 833-839, 2002.

PARVAIZ, A.; SATYAWATI, S. Salt stress and phytochemical responses of plants. *Plant Soil Environ*, v. 54, p. 89-99, 2008.

PATEL, S. K.; DUBEY, A. K.; SRIVASTAV, M.; SINGH, A. K.; DAHUJA, A.; PANDEY, R. N. Effect of NaCl in the irrigation water on growth, anti-oxidant enzyme activities, and nutrient uptake in five citrus rootstocks. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, v. 86, p. 189-195, 2011.

PEDROTTI, A.; CHAGAS, R. M. C.; RAMOS, V. C.; PRATA, N, A. P.; LUCAS, A. A. T.; SANTOS, P. B. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 19, p. 1308-1324, 2015.

PENG, Y.; ZHU, Y.; MAO, Y.; WANG, S.; SU, W.; TANG, Z. Alkali Grass resists salt stress through high [K⁺] and Na endodermis barrier to Na⁺. *Journal of Experimental Botany*, v. 55, p. 939-949, 2004.

PORTO, E. R; AMORIM, M. C. C.; DUTRA, M. T.; PAULINO, R. V.; BRITO, L. T. L.; MATOS, A. N. B. Rendimento da *Atriplex nummularia* irrigada com efluentes da criação de tilápia em rejeito da dessalinização de água. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p. 97–103, 2006.

PRICE, A. M.; AROS ORELLANA, D. F.; SALLEH, F. M.; STEVENS, R., ACOCK, R.; BUCHANAN-WOLLASTON, V. A comparison of leaf and petal senescence in wall flower reveals common and distinct patterns of gene expression and physiology. *Plant Physiology*, v.147, p.1898–1912, 2008.

QADIR M, STEFFENS D, YAN F, SCHUBERT S. Sodium removal from a calcareous saline-sodic soil through leaching and plant uptake during phytoremediation. *Land Degrad Dev*, v.14, p.301–307, 2003.

QADIR, M.; NOBLE, A. D.; SCHUBERT, S.; THOMAS, R. J.; ARSLAN, A. Sodcity-induced land degradation and its sustainable management: problems and prospects. *Land Degradation & Development*, v. 17, p. 661-676, 2006.

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.

QADIR, M.; QURESHI, R. H.; AHMAD, N. Recuperação de um solo salino-sódico por gesso e *Leptochloa fusca*. *Geoderma*, v.74, p.207-217, 1996.

QURESHI, M. I., ABDIN, M. Z.; AHMAD, J.; IQBAL, M. Effect of long-term salinity on cellular antioxidants, compatible solute and fatty acid profile of sweet annie (*Artemisia annua* L.). *Phytochemistry* v. 95, p. 215–223, 2013.

RABHI, M.; TALBI, O.; ATIA, A.; CHEDLY, A.; SMAOUI, A. Selection of halophyte that could be used in the bio reclamation of salt affected soils in arid and semi-arid regions. *Biosaline Agriculture and High Salinity Tolerance*, p. 242–246, 2008.

RAVINDRAM, K. C.; VENKATESAN, K.; BALAKRISHNAN, V.; CHELLAPPAN, K. P.; BALASUBRAMANIAN, T. Restoration of saline land by halophytes for Indian soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v.39, p.2661-2664, 2007.

REDONDO-GÓMEZ, S.; MATEOS-NARANJO, E.; DAVY, A. J.; FERNÁNDEZ-MUÑOZ, F.; CASTELLANOS, E. M.; LUQUE, T.; FIGUEROA, M. E. Growth and Photosynthetic Responses to Salinity of the Salt-marsh Shrub *Atriplex portulacoides*. *Annals of Botany*, v. 100; n. 3, p. 555-563, 2007.

REICHARDT, K; TIMM, L. C. Solo, Planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações. São Paulo: Manole, 2004. 478p.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. Tópicos em Ciência do Solo, volume 5. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 49-134, 2007.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. C. A. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.1805-1816, 2008.

RODRIGUES, R. de M. Comportamento vegetativo do Nim em solo salino-sódico tratado com insumos orgânicos. Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2011. (Dissertação de Mestrado).

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

SACRAMENTO, B. L.; CRUZ, T. S.; SILVA, L. L.; MOTA, K. N. A. B.; AZEVEDO NETO, A. D. Pigmentos e teores de solutos orgânicos em plantas de aguapé sob estresse salino. Enciclopédia Biosfera, v. 10, p. 3344-3354, 2014.

SÁNCHEZ, E.; D. SCORDIA, D.; LINO, G.; ARIAS, C.; S. L. COSENTINO, S. L.; NOGUÉS, S. Salinity and Water Stress Effects on Biomass Production in Different *Arundo donax* L. Clones. Bioenergetic Research, v. 8, p.1461–1479, 2015.

SANTOS, M. A. dos. Recuperação de solo-salino sódico por fitorremediação com *Atriplex nummularia* ou aplicação de gesso. UFRPE. Departamento de Agronomia. 2012. 96p. (Dissertação de Mestrado)

SANTOS, M. A. dos; FREIRE, M. B. G. dos S.; ALMEIDA, B. G. de; LINS, C. M. T.; SILVA, E. M. da. Dinâmica de íons em solo salino-sódico sob fitorremediação com *Atriplex nummularia* e aplicação de gesso. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 17, n. 4, p. 397-404, 2013.

SANTOS, R. V.; TERTULIANO, S. S. X. Crescimento de espécies arbóreas em solo salino sódico tratado com ácido sulfúrico. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.2, p.239-242, 1998.

SCALON, S. P. Q.; MUSSURY, R. M.; EUZÉBIO, V. L. M. de; KODAMA, F. M.; KISSMANN, C. Estresse hídrico no metabolismo e crescimento inicial de mudas de mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.). Ciência Florestal, v. 21, n. 4, p. 655-662, 2011.

SCHOLANDER, P.F.; HAMMEL, H.T.; BRADSTREET E.D.; HEMMINGSEN, E.A. Sap pressure in vascular plants. Science, Washington, v.148, p.339-346, 1965.

SEHRAWAT, N.; YADAV, M.; BHAT, K. V.; SAIRAM, R. J.; JAIWAL, P. K. effect of salinity stress on mungbean (*Vigna Radiata* (L.) Wilczek) during consecutive summer and spring seasons. *Journal of Agricultural Sciences*, v. 60, p. 23-32, 2015.

SHABALA, S. Salinity and programmed cell death: unravelling mechanisms for ion specific signalling. *Journal of Experimental Botany*, v. 60, p. 709–712, 2009.

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

SHAVRUKOV, Y. Salt stress or salt shock: which genes are we studying? *Journal Experimental Botanic*, v.64; p.119-27, 2013.

SHELEF, O., GROSS, A., RACHMILEVITCH, S. Role of plants in a constructed wetland:current and new perspectives. *Water* 5, 405–419, 2013.

SHELEF, O.; GROSS, A.; RACHMILEVITCH, S. The use of *Bassia indica* for salt phytoremediation in constructed wetlands. *Water Research*, v.46, p.3967–3976, 2012.

SILVA, E. N.; RIBEIRO, R. V.; FERREIRA-SILVA; S. L.; VIÉGAS, R. A.; SILVEIRA, J. A. G. Salt stress induced damages on the photosynthesis of physic nut young plants. *Scientia Agricola*. v. 68, n. 1, p. 62-68, 2011.

SILVA, F. C. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 2 ed. Brasília, DF: EMBRAPA Informação tecnológica, 2009. 627p.

SILVA, J. A. Estimativa de crescimento em altura de *Leucena* [*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.] por meio do modelo ARIMA. UFRPE. 2008. 64p. (Dissertação de Mestrado).

SILVA, M. B. R.; VIÉGAS, R, A.; DANTAS NETO, J.; FARIAS, S. A. R. Estresse salino em plantas da espécie florestal sabiá. *Caminhos de Geografia*, v. 10, n. 30, p. 120–127, 2009.

SILVA, R. M.; MASUTTI, C. S. M.; SILVA, J. A. B. Desenvolvimento inicial de juazeiro (*Ziziphus joazeiro*) e nim (*Azadirachta indica*) em solos afetados por sais no município de Juazeiro/BA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SALINIDADE, 2010. Fortaleza. Anais. Fortaleza: INCTSal, 2010. (CD-ROM).

SILVEIRA, J. A. G.; ARAÚJO, S. A. M.; LIMA, J. P. M. S.; VIÉGAS, R. A. Roots and leaves contrasting osmotic adjustment mechanisms in responses to NaCl-Salinity in *Atriplex nummularia*. *Environmental and Experimental Botany*, v.66, p.1-8, 2009.

SLAMA, I. T., CHNAYA, T., SAVOURE, A., ABDELLEY, C. Combined effects of longterm salinity and soil drying on growth water relations, nutrient status and proline accumulation of *Sesuvium portulacastrum*. *Comptes Rendus Biologies* 331, 442–45, 2008.

SMAOUI, A.; BARHOUMI, Z.; RABHI, M.; ABDELLEY, C. Localization of potential ion transport pathways in vesicular trichome cells of *Atriplex halimus* L. *Protoplasma*, v. 248, p. 363-372, 2011.

SOUSA, A. E. C.; LACERDA, C. F.; GHEYI, H. R.; SOARES, F. A. L.; UYED, C. A. Teores de nutrientes foliares e respostas fisiológicas em pinhão manso submetido a estresse salino e adubação fosfatada. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 25, n. 2, p. 144-152, 2012.

SOUZA, E. R. DE; FREIRE, M. B. G. DOS S.; CUNHA, K. P. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; RUIZ, H. A., LINS, C. T. Biomass, anatomical changes and osmotic potential in *Atriplex nummularia* Lindl. cultivated in sodic saline soil under water stress. *Environmental and Experimental Botany*, v.82, p.20-27, 2012.

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.

SOUZA, E. R. de; MELO, H. F. de; ALMEIDA, B. G. de; MELO, D. V. M. de. Comparação de métodos de extração da solução do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, p.510–517, 2013.

SOUZA, E. R.; FREIRE, M. B. G. S.; MELO, D. V. M.; MONTENEGRO, A. A. A. Management of *Atriplex nummularia* Lindl. in a salt affected soil in a Semi Arid Region of Brazil. *International Journal of Phytoremediation*, v.16, p.73-85, 2014.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, C. G. S.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, p.1301–1309, 2013.

SURIYAN, C.; CHALERMPOL, K. Effect of salt stress on proline accumulation, photosynthetic ability and growth characters in two maize cultivars. *Pak. Journal Botanicals*, v. 41, p. 87-98, 2009.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004, 613p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Plant physiology*. 5. ed. Sunderland: Sinauer, 2010. 782p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013, 954p.

TAN, W.; LIM, T.; LOH, C. A simple, rapid method to isolate salt glands for tree-dimensional visualization, fluorescence imaging and cytological studies. *Plant Methods*, v. 6, n. 24, p. 1-12, 2010.

TAVAKKOLI, E.; RENGASAMY, P.; MCDONALD, G. K. High concentrations of Na⁺ and Cl⁻ ions in soil solution have simultaneous detrimental effects on growth of faba bean under salinity stress. *Journal of Experimental Botany*, v. 61, p. 4449–4459, 2011.

THOMAS, G. W. Exchangeable cations. In: Page, A. L. (ed). *Methods of soil analysis. Part-2 chemical methods*. Madison: American Society of Agronomy, 1982, p.159-165.

UNITED STATES SALINITY LABORATORY – USSL STAFF. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington, U.S. Department of Agriculture, 1954. 160p. (Handbook 60).

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

VENKATESU, P.; LEE, M. J.; LIN, H. M. Thermodynamic characterization of the osmolyte effect on protein stability and the effect of GdnHCl on the protein denatured state. *Journal Physiology Chemistry*. v.111, p. 9045–9056, 2007.

VERSLUES, P. E.; SHARMA, S. Proline Metabolism and Its Implications for Plant-Environment Interaction. *The Arabidopsis Book*, v. 3. p. 2 – 23, 2010.

VOLKOV, V. Salinity tolerance in plants. Quantitative approach to ion transport starting from halophytes and stepping to genetic and protein engineering for manipulating ion fluxes. *Front Plant Science*, v. 6, 2015.

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

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

WOHLENBERG, E. V.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e sucessão, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, p.891-900, 2004.

YANG, J. Y.; ZHENG, W.; TIAN, Y.; Wu, D.; Zhou, W. Effects of various mixed salt-alkaline stresses on growth, photosynthesis, and photosynthetic pigment concentrations of *Medicago ruthenica* seedlings. *Photosynthetica*, v. 49, p. 275-284, 2011.

YAO, R.; FANG, S.; NICHOLS, N. J. A strategy of Ca^{2+} alleviating Na^+ toxicity in salt-treated *Cyclocarya paliurus* seedlings: photosynthetic and nutritional responses. *Plant Growth Regulation*, v.68, p. 351-359, 2012.

YEMM, E. W.; COCKING, E. F. The determination of amino acids with ninhydrin. *Analyst*, v. 80, p. 209-213, 1995.

YOKOI, S.; QUINTERO, F.J.; CUBERO, B.; RUIZ, M. T.; BRESSAN, R. A.; HASEGAWA, P. M.; PARDO, J. M. Differential expression and function of *Arabidopsis thaliana* NHX Na^1/H^1 antiporters in the salt stress response. *Plant Journal*, v. 30, p.529–539, 2002.

ZAHRAN, M. A; ABDEL WAHID, A. A. Contributions to the ecology of halophytes. *Tasks for Vegetation Science*, v. 2, pp.235–257, 1982.

ZHANG, L.; BECKER, D. F. Connecting proline metabolism and signaling pathways in plant senescence. *Front Plant Science*, v. 6., 2015.

ZHANG, L.; ZHANG, Z.; GAO, H.; XUE Z. C.; YANG, C.; MENG, X. L.; MENG, Q. W. Mitochondrial alternative oxidase pathway protects plants against photoinhibition by alleviating inhibition of the repair of photodamaged PSII through preventing formation of reactive oxygen species in *Rumex K-1* leaves. *Physiology Plant*. v.143, p. 396-407, 2011.

ZHU, J. K. Plant salt stress. In *Encyclopedia of Life Sciences*. John Wiley & Sons, Ltd., 2007.

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

ZHU, J. K. Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Current Opinion in Plant Biology*, v. 6, p.441–445, 2003.