



Atuação de diferentes corretivos na recuperação de solo salino-sódico cultivado com *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth.

Ivana Tito Sousa¹, Diogo de Souza Ferraz², Rafael Lima de Carvalho³, Luís Gonzaga Medeiros de Figueredo Júnior⁴, Boanerges Siqueira D'Albuquerque Junior⁴, Alan Medeiros da Silva¹, Silvia Correa Santos⁵

¹Bacharel em Engenharia Agrônoma, Universidade Estadual do Piauí (UESPI), 64.002-150 Teresina-PI, Brasil. ivanatito20@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-3794-7388> (autor correspondente). ²Professor Adjunto, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual do Piauí (UESPI), 64.002-150 Teresina-PI, Brasil. diogoferraz@cca.uespi.br; <https://orcid.org/0009-0006-0210-7110>. ³Doutorando em Agronomia, Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), 79804-970 Dourados-MS, Brasil. agrorafael23@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1667-3926>. ⁴Professor Associado, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual do Piauí (UESPI), 64.002-150 Teresina-PI, Brasil. luisjr@cca.uespi.br; <https://orcid.org/0000-0003-0938-3063>. ⁵Professor Associado, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual do Piauí (UESPI), 64.002-150 Teresina-PI, Brasil. boanergesjunior@cca.uespi.br; <https://orcid.org/0009-0003-5629-5821>. ¹Bacharel em Engenharia Agrônoma, Universidade Estadual do Piauí (UESPI), 64.002-150 Teresina-PI, Brasil. alanmedeiros82@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-7417-204X>. ⁵Professora Titular, Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), 79804-970, Dourados-MS, Brasil. silviasantos@ufgd.edu.br; <https://orcid.org/0000-0001-5483-8499>.

Artigo recebido em 10/01/2024 e aceito em 23/01/2024

RESUMO

A recuperação dos solos halomórficos da região Nordeste brasileira está condicionada à redução das concentrações dos sais dissolvidos e do sódio trocável, na magnitude que possibilite o crescimento e a produção vegetal. Por essa razão, objetivou-se, com este trabalho, avaliar o efeito de corretivos químicos, na recuperação de um solo salino-sódico, cultivado com *Pithecellobium dulce*. Dois experimentos foram conduzidos, em ambiente protegido, utilizando-se amostras de um solo salino-sódico, da camada de 0-20 cm, acondicionados em vasos, preenchidos com 3 dm³ do solo. O primeiro experimento constou de três tratamentos de correção do solo: sem corretivo (SC), gesso agrícola na dose de 100% da necessidade de gesso (G) e enxofre elementar (S), com 10 repetições. No segundo experimento, avaliou-se o crescimento inicial da espécie arbórea, em função de três tratamentos referentes à correção do solo do primeiro experimento, e um tratamento com substrato não salino, com seis repetições. A aplicação de gesso agrícola melhorou quimicamente o solo salino-sódico estudado, sobretudo, diminuindo a porcentagem de sódio trocável. A adição do enxofre elementar foi eficiente na redução da alcalinidade e salinidade do solo. O tratamento com gesso proporcionou aumentos significativos na altura e no incremento em altura das plantas, em relação ao tratamento sem corretivo, e na altura, no diâmetro do coleto e massa da matéria seca das raízes, em relação ao tratamento com enxofre. No entanto, o ambiente edáfico mais equilibrado quimicamente favoreceu um maior crescimento das plantas no substrato não salino.

Palavras-chave: sodicidade; alcalinidade; sulfato de cálcio; estresse abiótico.

Performance of different correctives in the recovery of saline-sodic soil cultivated with *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth.

ABSTRACT

The recovery of halomorphic soils in the Brazilian Northeast region is conditioned by a reduction in the concentrations of dissolved salts and exchangeable sodium, to the magnitude that allows plant growth and production. For this reason, the objective of this work was to evaluate the effect of chemical correctives on the recovery of a saline-sodic soil cultivated with *Pithecellobium dulce*. Two experiments were conducted, in a protected environment, using samples of a saline-sodium soil, from a layer of 0-20 cm, placed in pots, filled with 3 dm³ of soil. The first experiment consisted of three soil correction treatments: without soil amendment (SC), agricultural gypsum at a dose of 100% of the gypsum requirement (G) and elemental sulfur (S), with 10 replications. In the second experiment, the initial growth of the tree species was evaluated, depending on three treatments referring to soil correction from the first experiment, and a treatment with a non-saline substrate, with six replications. The application of agricultural gypsum chemically improved the studied saline-sodium soil, above all, reducing the percentage of exchangeable sodium. The addition of elemental sulfur was efficient in reducing soil alkalinity and salinity. The treatment with gypsum provided significant increases in the height and increase in height of the plants, in relation to the treatment without corrective, and in the height, in the stem diameter and dry matter mass of the roots, in relation to the treatment with sulfur. However, the more chemically balanced soil environment favored greater plant growth in the non-saline substrate.

Keywords: sodicity; alkalinity; calcium sulfate; abiotic stress.

Introdução

Os solos afetados por sais, também conhecidos por solos halomórficos são caracterizados pela alta concentração de sais solúveis, sódio trocável ou ambos em horizontes ou camadas superficiais. A salinidade do solo é considerada uma das principais ameaças à sustentabilidade dos solos agrícolas e, conseqüentemente, para a segurança alimentar em regiões semiáridas. As estimativas da abrangência das áreas salinas indicam que aproximadamente 6% dos solos em todo o mundo são afetados pela salinidade, dos quais 54% são afetados pela sodicidade (Pessoa et al., 2022).

A salinização primária ou natural pode ser desencadeado por fatores como clima, drenagem natural, topografia, posição do relevo, geologia, material de origem e distância do mar (Pessoa et al., 2022). No Semiárido nordestino, a acumulação de sais provenientes de áreas circunvizinhas, nos horizontes superiores dos solos de áreas rebaixadas, é a principal causa de salinização natural (Melo et al., 2019).

No entanto, grande parte do processo de salinização dos solos é considerada secundária, devido a atividades antrópicas. Nesse caso, práticas de irrigação, drenagem insuficiente e manejo inadequado das terras agrícolas vêm contribuindo enormemente para acelerar o processo de salinização do solo. Independentemente da causa, a salinização resulta numa redução drástica da fertilidade do solo, da cobertura vegetal e da biodiversidade, impactando o ecossistema, as funções do solo, levando à sua degradação e conseqüente desertificação (Pessoa et al., 2022).

O processo de salinização envolve a concentração de sais solúveis na solução do solo e resulta na formação dos solos salinos. A sodificação é o processo de passagem do íon Na^+ da solução do solo para o complexo de troca, formando os solos denominados de salino-sódicos, enquanto a dessalinização, promove a lavagem dos sais solúveis, resultando na formação de solos unicamente sódicos. Os solos salino-sódicos são formados quando a percentagem de sódio trocável (PST) atinge valores maiores ou iguais a 15%, e os níveis de salinidade permanecem altos, com uma condutividade elétrica do extrato de saturação (CE) $\geq 4,0 \text{ dS.m}^{-1}$ (Ribeiro; Ribeiro Filho; Jacomine, 2016).

A sodificação começa a ter importância quando o sódio constitui a metade ou mais dos cátions solúveis da solução do solo. Nestas condições, os íons Ca^+ e Mg^+ , por serem menos solúveis, precipitam quando a solução do solo se

concentra em consequência da evapotranspiração, ficando o Na^+ , praticamente, como o único cátion presente na solução. Por este motivo, o Na^+ , apesar de ter menor poder de troca, consegue deslocar os outros cátions por ação de massa (Ribeiro; Ribeiro Filho; Jacomine, 2016). A alta concentração de sódio trocável, além de induzir a pH elevado, leva à expansão e dispersão das argilas, degradação da estrutura porosa do solo e à redução das taxas de infiltração da água que, entre outros impactos, restringem o crescimento das raízes, a capacidade de retenção de água do solo e potenciam a erosão (Paz et al., 2020). A dispersão causada pelo sódio é devido ao maior raio hidratado do elemento e à pouca atração que exerce sobre os colóides do solo por ser monovalente (Maia, 2021).

Durante as décadas passadas, o conhecimento sobre os mecanismos pelos quais as plantas respondem e se adaptam ao estresse salino, alcançaram progressos significativos (Zhou et al., 2023). As plantas são suscetíveis aos efeitos prejudiciais da salinidade durante todo o seu ciclo de vida, mas são mais vulneráveis durante a fase de germinação e plântula. Em condições de altos níveis de sais solúveis na solução do solo, pode ocorrer toxicidade de íons específicos e desequilíbrio de nutrientes, assim como, dificuldade na absorção de água, devido à pressão osmótica, levando a estresse hídrico (Atta et al., 2023).

O impacto mais visível da degradação do solo causado pelo acúmulo de sais é a perda da cobertura vegetal. Quando isso acontece, o processo já está bem avançado, comprometendo o desenvolvimento de plantas cultivadas e até espécies espontâneas adaptadas ao meio ambiente e tolerantes aos sais. Surge então a necessidade de utilizar técnicas que possam promover a melhoria nas condições edáficas, visando a sobrevivência das plantas para que as áreas degradadas pela salinidade possam ser revegetadas (Gheyi et al., 2022).

Para recuperar solos degradados por sais, as práticas fundamentais envolvem a melhoria da agregação do solo e o aumento da condutividade hidráulica, por métodos químicos, mecânicos ou biológicos, drenagem do lixiviado, e aumento da concentração de cálcio no solo, em substituição ao sódio no complexo de troca, por meio da adição de corretivos químicos (Santos et al., 2019). A quantidade de sódio removido ou a taxa de decréscimo da PST e o pH do solo, são parâmetros químicos utilizados para avaliar a eficiência do

corretivo no melhoramento de solos com excesso de sódio (Martins, 2021).

Os produtos mais empregados para substituir o sódio do complexo de troca do solo por cálcio são o sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), comumente conhecido como gesso, e o enxofre elementar (S^0). O uso desses corretivos em solos salino-sódicos devem ser associados à lavagem do solo, por meio da lixiviação, pois a água aplicada dissolve, transporta o corretivo para a subsuperfície e remove os sais solúveis de sódio que se formam após a troca de cátions (Melo et al., 2019).

Os principais efeitos do gesso na melhoria química do solo são a diminuição da percentagem de sódio trocável e do pH e aumento nos teores de cálcio trocável (Cavalcanti et al., 2018). Apesar da sua baixa solubilidade em água ($2,16 \text{ g L}^{-1}$), o gesso é o corretivo mais utilizado em razão do baixo preço, disponibilidade no mercado e fácil manuseio, adicionalmente a isso, funciona como fonte de enxofre e cálcio para as plantas (Cavalcante et al., 2016; Silva et al., 2020).

A aplicação de enxofre elementar ao solo tem grande significado agrônômico, primeiro, pela presença do SO_4^{2-} , que é requerido em grandes quantidades pelas plantas, e segundo, pela ação do H_2SO_4 sobre o pH do solo. A queda do pH pode ser necessária para o cultivo agrícola em solos alcalinos e pode controlar a população microbiana do solo (Ranadev et al., 2023). A efetividade do enxofre elementar depende de sua oxidação, realizada por microrganismos aeróbios do solo, especialmente do gênero *Acidithiobacillus*. Estes, por sua vez, são influenciados pelas variáveis químicas do solo, como pH inicial do solo, concentração de matéria orgânica e disponibilidade de nutrientes, associado a variáveis físicas como temperatura, umidade e aeração (Dall'Orsoletta et al., 2022).

Pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de estudar, entre os corretivos, os que proporcionam uma correção mais efetiva, assim como, a melhor dosagem e o período de incubação necessário (Martins, 2021; Santos et al., 2019; Severo et al., 2019; Silva et al., 2020). Entretanto, nos solos com teores elevados de sódio há grande dificuldade em implementar a correção na prática, pela dificuldade de incorporação do corretivo e de penetração de água no perfil. Portanto, se faz necessário analisar a magnitude das melhorias proporcionadas pelo gesso e pelo enxofre em condições ambientais específicas.

O planejamento adequado do manejo de solos afetados por sais implica na utilização de espécies vegetais mais tolerantes aos efeitos dos sais nos solos. Algumas espécies arbóreas podem

inclusive melhorar as condições desses solos, reduzindo a ascensão de água com sais no perfil do solo (Cavalcante et al., 2016). *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth. é considerada uma alternativa viável no planejamento de programas de recuperação ambiental, e a sua exploração vem se intensificando em circunstância de seus múltiplos usos. Entretanto, há necessidade de estudos envolvendo a espécie, com o objetivo de avaliar o seu desenvolvimento em solos salino-sódicos da região Nordeste brasileira.

Popularmente conhecida como mata-fome (Brasil) e guamúchil (México e América Central), *P. dulce* é uma Fabaceae arbórea, de rápido crescimento, considerada pioneira na sucessão ecológica (Basave-Villalobos et al., 2020). De acordo com estudos realizados em regiões tropicais, *P. dulce* produz uma copa com elevada biomassa, o que contribui para um aporte de serapilheira e conseqüentemente para a proteção do solo e recuperação de nutrientes (Ceccon; Sánchez; Powers, 2014).

Os principais usos são como árvore de sombra, lenha, cerca viva, extração de fibra natural, farmacêutico e fonte de alimento para aves e humanos. As folhas e os frutos são utilizados na alimentação de caprinos, em combinação com outras plantas, o que indica o seu potencial de uso na elaboração de ração animal (Ortega-Álvarez; Pacheco-Flores; Casas, 2022; Sathishkumar et al., 2023).

O impacto ambiental, econômico e social que pode ser causado com a aceleração dos processos de salinização e sodificação, exige que estratégias de recuperação e manejo de solos sejam avaliadas. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar a atuação de diferentes corretivos na redução da alcalinidade, sodicidade e salinidade de um solo cultivado com *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth., na cidade de Teresina, Piauí.

Material e métodos

Dois experimentos foram conduzidos, no âmbito do Programa Institucional de Iniciação Científica, da Universidade Estadual do Piauí – UESPI, em ambiente protegido, que permite a passagem de 70% da luminosidade natural, no período de março a julho de 2021, na cidade de Teresina, Piauí, com coordenadas geográficas $05^{\circ}05'21''\text{S}$ e $42^{\circ}48'07''\text{W}$, e altitude de 72 m. O clima de Teresina é caracterizado como subúmido seco e megatérmico (Melo; Andrade Júnior; Pessôa, 2019). Durante o período experimental a temperatura do ar média foi de $27,8^{\circ}\text{C}$, a umidade relativa do ar média foi de 68,4%, e a precipitação

pluviométrica acumulada foi de 694,2 mm (Bastos; Andrade Júnior, 2023).

Foram utilizadas amostras de um solo salino-sódico, da camada de 0 - 20 cm, em área de Caatinga, utilizada para a produção de caprinos e ovinos, localizada no município de Serra Talhada, Pernambuco (Figura 1). O local de coleta não

apresenta histórico de uso agrícola, pelo menos, durante os últimos 40 anos, no entanto, o solo é afetado pela acumulação de sódio, o que vem resultando em processos de compactação e erosão, e na ausência de cobertura vegetal devido à dificuldade de estabelecimento das espécies vegetais nativas (Figura 2).

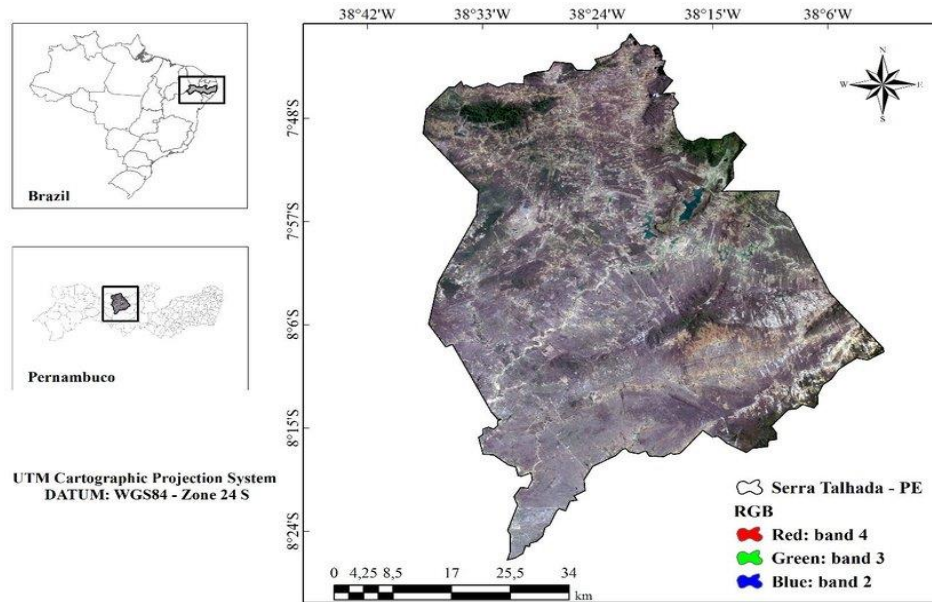


Figura 1. Localização geográfica do município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil. Fonte: Lins et al. (2017)



Figura 2. Área de coleta do solo salino-sódico, no município de Serra Talhada, Pernambuco.

Após secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha de 2,0 mm, as amostras do solo foram encaminhadas ao laboratório Agrolab – Análises Ambientais, em Recife, Pernambuco, para caracterização química e física de acordo com metodologia proposta por Teixeira et al. (2017). Foram determinados o pH em água, as concentrações de Ca^{+2} , Mg^{+2} , H^+ , Al^{+3} , Na^+ , K^+

trocáveis, P disponível, matéria orgânica e nitrogênio. Para a caracterização física foram analisados a granulometria, densidade do solo e densidade de partículas, porosidade total e umidade correspondente às tensões de -0,033 e -1,5 MPa. Foi determinada também a condutividade elétrica no extrato de saturação do solo (Tabela 1).

Tabela 1. Atributos químicos e físicos do solo salino-sódico e do substrato comercial não salino utilizados no experimento, na cidade de Teresina, PI.

Solo salino-sódico			
Atributos químicos	Valor	Atributos físicos	Valor
pH (H ₂ O)	9,5	Areia (g kg ⁻¹)	532
P (mg dm ⁻³)	3,0	Silte (g kg ⁻¹)	198
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,2	Argila (g kg ⁻¹)	270
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	51,1	Ds (g cm ⁻³)	1,29
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,0	Dp (g cm ⁻³)	2,44
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,50	Porosidade (m ³ m ⁻³)	0,47
H ⁺ +Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,0		
SB (cmol _c dm ⁻³)	52,8	Umidade (g 100g ⁻¹)	
CTC (cmol _c dm ⁻³)	52,8	1,5 MPa	8,9
V (%)	100	0,03 MPa	14,4
PST (%)	96,8	Água Útil	5,5
Carbono (g kg ⁻¹)	1,6		
Nitrogênio (g kg ⁻¹)	0,1	CE _{es} (dS m ⁻¹)	88,5
Matéria Orgânica (g kg ⁻¹)	2,8		
Substrato não salino			
Atributos químicos	Valor		
pH (H ₂ O)	5,3		
P (mg dm ⁻³)	181,30		
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,94		
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,38		
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	9,80		
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	4,00		
H ⁺ +Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	5,00		
SB (cmol _c dm ⁻³)	15,12		
CTC (cmol _c dm ⁻³)	20,12		
V (%)	75,15		
PST (%)	1,89		

Fonte: Agrolab – Análises Ambientais (2021)

SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions (T); V: saturação por bases; PST: percentagem de sódio trocável; CEEs: condutividade elétrica do extrato de saturação.

No primeiro experimento, o delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), com três tratamentos de correção do solo e 10 repetições, totalizando 30 parcelas experimentais. Os tratamentos foram: sem aplicação de corretivo (SC); gesso agrícola na dose de 100% da necessidade de gesso (G); enxofre elementar (S). Cada parcela foi constituída de um vaso de 3,8 dm³,

preenchidos com 3,0 dm³ de solo. A dose de gesso (CaSO₄.2H₂O) foi determinada para condições de ambiente protegido e solo com estrutura deformada, usando a fórmula $NG = 0,86 \text{ Na+X} / GP$, em que: NG = necessidade de gesso (g kg⁻¹ solo); Na+X = sódio trocável do solo (cmol_c kg⁻¹); e, GP = grau de pureza do gesso, em unidade decimal (Sousa et al., 2012). O gesso utilizado

continha 21% de cálcio e 17% de enxofre, e grau de pureza de 80%. A dose de enxofre elementar (grau de pureza = 99%) foi calculada com base na dose de gesso, objetivando fornecer a mesma quantidade de enxofre fornecida pelo sulfato de cálcio. O gesso e o enxofre foram incorporados nos primeiros 5 cm do solo.

Após a aplicação dos corretivos, os solos foram mantidos durante 30 dias com umidade correspondente a aproximadamente 70% da capacidade de campo. Em seguida, foi aplicada uma lâmina de água não salina, equivalente a duas vezes o volume de poros do solo. Após a lavagem foi realizada uma amostragem em quatro das dez repetições, para uma nova caracterização química do solo, conforme os procedimentos descritos em Teixeira et al. (2017). Nas mesmas amostras, foi realizada a caracterização da salinidade do solo avaliando-se, no extrato de saturação, a condutividade elétrica.

O segundo experimento também foi conduzido em DIC, com quatro tratamentos e seis repetições, totalizando 24 parcelas experimentais. Os tratamentos foram compostos pelos solos submetidos aos tratamentos do primeiro experimento (solo salino-sódico sem adição de corretivo; solo salino-sódico + gesso; solo salino-sódico + enxofre elementar) e um tratamento com substrato comercial não salino, para crescimento de plantas. Os atributos químicos do substrato comercial encontram-se na Tabela 1.

Nos vasos, com 3,0 dm³ de solo, foram cultivadas mudas da espécie arbórea *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth., durante 75 dias. As parcelas experimentais foram constituídas de um vaso com uma planta. As sementes foram germinadas em tubetes de 100 ml preenchidos com substrato comercial para produção de mudas. Após alcançarem cerca de 10 cm de altura, as mudas foram selecionadas pela uniformidade e transferidas para os vasos com os solos, ocasião em que foram tomados os valores de altura de cada planta no tempo zero, para fins de cálculo do incremento em altura das plantas, com auxílio de trena milimetrada. Todos os vasos receberam água não salina, no mesmo volume, mantendo-se umidade adequada ao crescimento vegetal inicial (Sousa et al., 2012).

Após 75 dias do transplantio foram realizadas medições da altura das plantas, com auxílio de trena milimetrada, e do diâmetro ao nível do coleto, com o auxílio de paquímetro. Posteriormente, as partes aéreas das plantas foram separadas das raízes e postas para secar em estufa de circulação de ar forçada a 65 °C até atingir massa constante, sendo em seguida, pesadas em

balança de precisão (0,01 g), para obtenção da massa da matéria seca da parte aérea e das raízes.

Em ambos os experimentos foi realizada análise de variância e teste de médias (Tukey), através do software BioEstat (Ayres et al., 2007) adotando-se, em todas as análises, nível de 5% de probabilidade.

Resultados e discussão

A aplicação dos corretivos mostrou efeito significativo nos atributos do solo (Tabela 2). A adição de enxofre (S) foi o tratamento que mais contribuiu para a diminuição do pH do solo (Tabela 2). Verifica-se, como esperado, que a correção do solo com enxofre elementar promoveu a diminuição significativa dos valores do pH do solo, provavelmente, devido à sua oxidação biológica, formando H₂SO₄ (Martins, 2021; Ranadev et al., 2023).

A adição de gesso (G) promoveu a redução do pH, em comparação ao tratamento em que não houve aplicação de corretivo (SC). Este resultado também foi observado por Albuquerque, Fonseca e Santos (2018), em solo salinizado de perímetro irrigado no Semiárido brasileiro. Provavelmente, o sulfato de cálcio adicionado elevou a concentração de sais solúveis neutralizantes, que previnem a hidrólise do sódio, e conseqüentemente, o aumento do pH (Ferreira; Silva; Ruiz, 2016). A redução do pH pode ser explicada pela lixiviação dos ânions carbonatos, bicarbonatos e hidroxilas do solo, deixando um déficit de OH⁻ no solo e ficando mais H⁺.

O tratamento com adição de gesso agrícola proporcionou declínio significativo no percentual de sódio trocável. Observa-se uma redução de 84,3% na PST, em comparação com o tratamento sem corretivo (Tabela 2). Esse parâmetro químico expressa a proporção de Na⁺ em relação aos demais cátions do solo. A diminuição dos teores trocáveis de Na⁺ pela aplicação do sulfato de cálcio é decorrente principalmente do deslocamento do sódio do complexo de troca pelo cálcio liberado pelo corretivo. Nesse processo, o sódio deslocado reage com os ânions sulfatos, formando sulfato de sódio, o qual é removido da solução do solo, após a aplicação de uma lâmina de água (Cavalcanti et al., 2018; Santos et al., 2019).

Verificou-se que, após a aplicação da lâmina de lixiviação dos sais, houve diminuição de 94,5% da salinidade do solo, no tratamento SC (Tabela 2), medida pela condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), em relação aos valores iniciais (Tabela 1). No tratamento sem corretivo, a simples prática da lavagem reduziu o valor da

variável para próximo do limite inferior de classificação de solo salino, que corresponde à 4,0 dS m⁻¹. Estudos indicam que a lavagem do solo pode promover redução de 80% ou mais da salinidade, na camada de 0-20 cm do solo (Gheyi et al., 2022). Essa redução da CEes com a simples lavagem não era esperada, principalmente se considerarmos a proporção de argila nesse solo (Tabela 1), a sua dispersão e a redução da macroporosidade do solo, dificultando o processo de lixiviação dos sais.

Apesar do solo tratado com gesso ter também apresentado decréscimo (Tabela 2), em relação à CEes antes da aplicação do corretivo (Tabela 1), o valor foi superior aos demais tratamentos, provavelmente devido adição de Ca⁺² ao solo. Pessoa et al. (2022) observaram correlação positiva entre a concentração de cálcio trocável e a condutividade elétrica em solos halomórficos, com diferentes usos no Semiárido nordestino.

Tabela 2. Parâmetros e classificação química dos solos afetados por sais, após aplicação dos tratamentos e da lâmina de lixiviação, na cidade de Teresina, PI.

Tratamentos	pH (H ₂ O)	PST %	CE _{es} dS m ⁻¹	Classificação*
SC	9,7 a	55,56 a	4,83 c	Salino-sódico
S	7,1 c	33,80 b	9,77 b	Salino-sódico
G	8,7 b	8,72 c	36,93 a	Salino

Fonte: Agrolab – Análises Ambientais (2021)

SC: solo sem corretivo; S: solo tratado com enxofre; G: solo tratado com gesso; PST: percentagem de sódio trocável CEes: condutividade elétrica do extrato de saturação. médias seguidas de letras iguais, nas colunas, não diferem entre si (Tukey a 5%);

*Classificação de acordo com Richards (1954)

Na Tabela 3, observa-se redução dos teores de sódio e a significativa elevação dos teores de cálcio pela aplicação do gesso. Esse fato é decorrente de ser o gesso fonte de cálcio, e após a solubilização do corretivo ocorre liberação do cátion para a solução, e posteriormente parte é lixiviado com a lavagem do solo.

O ácido sulfúrico, formado no tratamento com enxofre, deve ter contribuído para aumentar a solubilização de minerais contendo magnésio e cálcio, elevando assim os teores trocáveis desses elementos, assim como, do alumínio do solo (Ranadev et al., 2023) (Tabela 3).

Tabela 3. Atributos químicos dos solos, após aplicação dos tratamentos e da lâmina de lixiviação, na cidade de Teresina, PI.

Tratamentos	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	V
	mg dm ⁻³	----- cmol _c dm ⁻³ -----			-----		%
SC	6,13 a	0,23 a	2,78 a	1,00 b	0,53 b	0,50 b	90,02 b
S	6,10 a	0,22 a	2,75 a	1,87 b	2,20 a	1,17 a	85,75 c
G	3,93 a	0,22 a	2,66 b	26,58 a	0,60 b	0,70 b	97,73 a

Fonte: Agrolab – Análises Ambientais (2021)

SC: solo sem corretivo; S: solo tratado com enxofre; G: solo tratado com gesso; V: saturação por bases; médias seguidas de letras iguais, nas colunas, não diferem entre si (Tukey a 5%).

A eficiência do enxofre, na recuperação de solos salino-sódicos, depende de fatores como manutenção da umidade do solo próxima da capacidade de campo e do tempo necessário para que ocorra a oxidação biológica, pela bactéria aeróbica do gênero *Acidithiobacillus*, assim como, da presença de carbonatos alcalinos terrosos no

solo, por ser um corretivo que reduz consideravelmente o pH (Gheyi et al., 2022; Ranadev et al., 2023). No caso do solo em estudo, a redução do pH pode aumentar a disponibilidade de alguns nutrientes para as plantas, no entanto, considerando o reduzido teor de Ca⁺² no solo, antes da aplicação dos tratamentos (Tabela 1), o uso do

enxofre elementar pode requerer a aplicação de fonte adicional do macronutriente ao solo para a sua manutenção em um nível adequado para a produção vegetal.

A aplicação dos corretivos ao solo salino-sódico, seguido da lavagem com água não salina equivalente a duas vezes o volume de poros, melhorou significativamente os seus atributos químicos. No entanto, os valores obtidos para os parâmetros que expressam a alcalinidade, sodicidade e salinidade ainda permaneceram elevados em relação aos valores de referência. O decréscimo significativo da PST no tratamento com gesso promoveu a mudança de classificação química do solo salino-sódico para solo salino (Tabela 2).

As plantas de *Pithecellobium dulce*, de maneira geral, apresentaram maior crescimento quando cultivadas no substrato não salino (Tabela 4). Quando cultivadas em solo salino-sódico, correspondente aos tratamentos SC e S, 83,3% das plantas apresentaram crescimento paralisado ao final dos 75 dias.

Na Tabela 4, observa-se que o tratamento com gesso proporcionou aumentos significativos na altura e no incremento em altura das plantas, em

relação ao tratamento sem adição de corretivo, e na altura e diâmetro do coleto, em comparação ao tratamento com adição de enxofre.

Em relação à produção de matéria seca da parte aérea, os solos afetados por sais não se diferenciaram significativamente. No entanto, observa-se, na Tabela 4, que o tratamento com gesso proporcionou maior massa de matéria seca nas raízes em comparação com o tratamento com enxofre. Para a variável massa de matéria seca total, não se observou diferença significativa entre o solo tratado com gesso e o substrato não salino.

Os valores biométricos e de biomassa chamam atenção para um aumento sensível no crescimento de *P. dulce* no solo tratado com gesso, quando comparado com os outros dois ambientes afetados por sais (SC e S). O fato deve-se ao estabelecimento de melhores condições químicas, e, possivelmente físicas, nesse solo. Como observa-se nas Tabelas 2 e 3, o solo tratado com gesso proporcionou um ambiente com menor PST e concentração de sódio trocável e maior concentração de cálcio, o que pode ter favorecido o crescimento das plantas.

Tabela 4. Altura (A), incremento em altura (IA), diâmetro do coleto (D), massa da matéria seca da parte aérea (MSPA), massa da matéria seca da raiz (MSR) e massa da matéria seca total (MST) de *Pithecellobium dulce* após 75 dias do transplantio, em função dos tratamentos de correção do solo, na cidade de Teresina, PI.

Tratamentos	A	IA	D	MSPA	MSR	MST
	----- cm -----	-----	mm	----- g -----	-----	-----
SC	12,8 c	2,8 c	1,33 bc	0,093 b	0,038 ab	0,131 b
S	13,2 c	4,5 bc	1,00 c	0,139 b	0,033 b	0,172 b
G	19,2 b	9,6 b	1,67 ab	0,156 b	0,056 a	0,212 ab
T	27,5 a	17,9 a	2,00 a	0,260 a	0,043 ab	0,303 a

SC: solo sem corretivo; S: solo tratado com enxofre; G: solo tratado com gesso; T: substrato não salino; médias seguidas de letras iguais, nas colunas, não diferem entre si (Tukey a 5%).

O Ca⁺² é fundamental para manutenção da integridade e permeabilidade das células, sendo responsável pela divisão e expansão celular (Silva et al., 2021). Em contraste, a PST, a partir de 24% pode afetar significativamente o desenvolvimento das plantas, inclusive aquelas mais tolerantes à sodicidade do solo (Barbosa et al., 2019). Sá et al. (2013) observaram maior influência da salinidade do solo na matéria seca total, principalmente no crescimento de *Mimosa tenuiflora* e *Enterolobium contortisiliquum*. Os autores observaram que o decréscimo significativo da percentagem de sódio trocável e o aumento da concentração de cálcio favoreceram maior acúmulo de biomassa nas duas espécies arbóreas.

Os sintomas de toxicidade de sódio apareceram nas plantas de *P. dulce* em forma de necrose, nas bordas das folhas, nos primeiros dias após o transplantio, e se intensificaram até a necrose total da maioria das folhas, nos tratamentos sem adição de corretivo e com adição de enxofre (SC e S), ao final do período experimental. Segundo Basave-Villalobos et al. (2020), em ambiente não salino, a espécie apresenta rápido crescimento a partir da quarta semana após a semeadura, porém, esta característica só foi observada nas plantas submetidas aos tratamentos G e T. Deve-se salientar o comprometimento da qualidade física do solo, sobretudo no tratamento SC, provavelmente, devido a dispersão das argilas, resultando na redução da condutividade hidráulica

(Paz et al., 2020), como pôde ser observado através da acumulação de água na superfície do solo.

A salinidade, geralmente, afeta as plantas ocasionando estresse hídrico, que limita o crescimento e reduz a produtividade. Os íons Na^+ e Cl^- quando absorvidos e acumulados nos tecidos causam citotoxicidade que eventualmente resulta em queima de folhas, crescimento reduzido e, finalmente, morte da planta. Além disso, alta concentração de Na^+ diminui a disponibilidade de outros íons como K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} devido à competição de cátions, que pode levar à deficiência de nutrientes. A salinidade resulta frequentemente em um acúmulo excessivo de espécies reativas de oxigênio, que podem interagir com outros componentes essenciais das células vegetais e causar estresse oxidativo, provocando danos ao DNA, inativação de proteínas e enzimas e desequilíbrios nutricionais (Atta et al., 2023).

Na Figura 3, observa-se as proporções entre a massa da matéria seca da raiz e da parte

aérea. No solo não salino (T) a proporção da biomassa aérea foi maior (85,8%), em comparação com os solos afetados por sais. Em um estudo, utilizando solo não salino, *P. dulce* respondeu ao aporte de nutrientes, com aumento da proporção de massa da matéria seca da parte aérea. Ao final do período de 120 dias após a germinação, no tratamento que favoreceu o maior crescimento, observou-se que aproximadamente 77% da biomassa total acumulada era composta pela parte aérea da planta (Basave-Villalobos, 2020).

A redução da proporção de massa da matéria seca da parte aérea, nos solos afetados por sais, pode estar relacionado com as limitações químicas e físicas impostas às plantas. De modo geral, as plantas cultivadas em ambiente salino apresentam a massa da matéria seca da parte aérea mais afetada do que a massa da matéria seca das raízes (Lemes et al., 2018; Ricardi; Rosa, 2018).

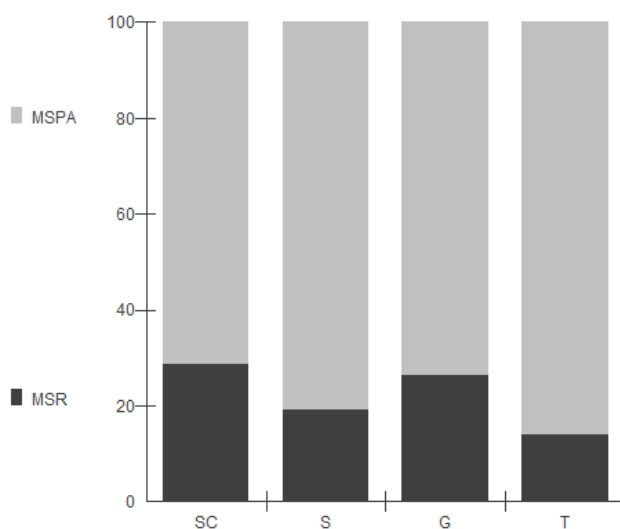


Figura 3. Proporção entre a massa da matéria seca da raiz (MSR) e da parte aérea (MSPA), em *Pithecellobium dulce* após 75 dias do transplante, na cidade de Teresina, PI. SC: solo sem corretivo; S: solo tratado com enxofre; G: solo tratado com gesso; T: substrato não salino.

Os resultados obtidos com *P. dulce* confirmaram essa tendência (Tabela 4). A alta exigência, em termos de capacidade de transporte e seletividade, requer, em muitos casos, energia metabólica produzida a partir de carboidratos das raízes, o que afeta seu desenvolvimento. Diante disso, a planta envia mais assimilados para o local do estresse (raízes), para aumentar o crescimento desse órgão em detrimento da parte aérea (Lemes et al., 2018).

Entretanto, Pereira et al. (2023) ao observarem redução do crescimento da parte aérea com o aumento da salinidade, sem efeito significativo para o crescimento da raiz, sugeriram que *Spondia tuberosa* adquiriu adaptabilidade no sistema radicular frente às condições naturais de estresse sob as quais se encontra na natureza.

Pithecellobium dulce se apresentou mais sensível à sodicidade do que à salinidade do solo. Essa afirmação é embasada pelo maior crescimento

da espécie no solo salino (G), com menor PST e com elevada CEes (Tabela 2), em comparação com o crescimento em ambientes com maior PST, representados pelos solos salino-sódicos (SC e S).

Conclusões

O gesso é mais efetivo do que o enxofre na redução da sodicidade do solo salino-sódico.

O enxofre é mais efetivo do que o gesso na redução da alcalinidade e da salinidade do solo salino-sódico.

O crescimento inicial de *Pithecellobium dulce* é reduzido significativamente em condição de solo na qual a percentagem de sódio trocável é igual ou superior a 8,72%.

Agradecimentos

Ao CCA e à PROP da Universidade Estadual do Piauí (UESPI) e ao grupo de pesquisa FRUTGRAN da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) pela parceria e comprometimento com o desenvolvimento da pesquisa.

Referências

Albuquerque, A. S., Fonsêca, N. C., & dos Santos, R. V. 2018. Aplicação de corretivos alternativos em solo salinizado com cultivo de *Sorghum bicolor* L. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, 13(4), 452-458. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v13i4.5731>

Atta, K., Mondal, S., Gorai, S., Singh, A. P., Kumari, A., Ghosh, T., & Jespersen, D. 2023. Impacts of salinity stress on crop plants: improving salt tolerance through genetic and molecular dissection. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1241736>

Ayres, M.; Ayres Junior, M.; Ayres, D.L.; Santos, A.A.S. 2007 BioEstat 5.0.: aplicações estatísticas nas áreas das Ciências Biomédicas. Belém: Sociedade Civil Mamirauá.

Barbosa, J. L., Nobre, R. G., Souza, L. D. P., de SA Veloso, L. L., da Silva, E. L., & Guedes, M. A. 2019. Crescimento de algodoeiro colorido cv. BRS Topázio em solos com distintas salinidades e adubação orgânica. *Revista de Ciências Agrárias*, 42(1), 206-213. <https://doi.org/10.19084/RCA17294>

Basave-Villalobos, E., Cetina-Alcalá, V. M., López-López, M. Á., Trejo, C., Ramírez-Herrera, C., & Conde-Martínez, V. 2020. Fertilización de *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth en vivero: efectos en la calidad de planta.

Madera y bosques, 26(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632059>

Bastos, E.A.; Andrade Júnior, A.S. Boletim agrometeorológico de 2021 para o município de Teresina, PI. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2023. 39 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-depublicacoes/-/publicacao/1152327/boletimagrometeorologico-de-2021-para-o-municipio-de-teresina-pi>. Acesso em: 10 nov. 2023.

Cavalcante, L.S.; Santos, R.V.; Hernandez, F.F.F.; Gheyi, H.R.; Dias, T.J.; Nunes, J.C. & Lima, G.S. 2016. Recuperação de solos afetados por sais In: Gheyi, H.R.; Dias, N.S.; Lacerda, C.F. & Gomes Filho, E. (ed.). Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCTSal. p. 461-477.

Cavalcanti, N. de S., Rolim, M. M., Júnior, J. A. S., Barros, M. de F. C., & Pedrosa, E. M. R. 2018. Resíduo de gesso na recuperação de solo salino-sódico proveniente de perímetro irrigado do Semiárido brasileiro. *Irriga*, 23(3), 505-517. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2018v23n3p505-517>

Ceccon, E., Sánchez, I., & Powers, J. S. 2015. Biological potential of four indigenous tree species from seasonally dry tropical forest for soil restoration. *Agroforestry Systems*, 89, 455-467. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9782-6>

Dall'orsoletta, D.J.; Mumbach, G.L.; Brignoli, F.M., & Gatiboni, L.C. 2022. Elemental sulfur recommendation for pH reduction in soils from Southern Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 26(3), 212-218. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n3p212-218>

Ferreira, P.A.; Silva, J.B.L. & Ruiz, H.A. 2016. Aspectos físicos e químicos de solos em regiões áridas e semiáridas. In: Gheyi, H.R.; Dias, N.S.; Lacerda, C.F. & Gomes Filho, E. (ed.) Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCTSal. p. 17-34.

Gheyi, H. R., Lacerda, C. F., Freire, M. B. G. S., Costa, R. N. T., Souza, E. R. D., Silva, A. O. D., & Cavalcante, L. F. 2022. Management and reclamation of salt-affected soils: general assessment and experiences in the Brazilian semiarid region. *Revista Ciência Agronômica*, 53. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220058>

Lemes, E. S., de Oliveira, S., das Neves, E. H., Ritter, R., de Mendonça, A. O., & Meneghello, G. E. 2018. Crescimento inicial e acúmulo de sódio em plantas de arroz submetidas à salinidade. *Revista de Ciências Agrárias*

- Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 61. <http://dx.doi.org/10.22491/rca.2018.2764>
- Maia, C.E. 2021. Salinidade do solo em sistemas agropecuários do bioma Caatinga. In: SOUZA, H.A.; LEITE, L.F.C.; MEDEIROS, J.C. (ed.). Solos sustentáveis para a agricultura no Nordeste. Brasília: Embrapa. p. 409-438.
- Martins, M. D. S. 2021. Solos salino-sódicos condicionados com gesso e enxofre com *Acidithiobacillus thiooxidans*. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/8841>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- Melo, F.B.; Andrade Júnior, A.S.; Pessôa, B.L.O. 2019 Levantamento, zoneamento e mapeamento pedológico detalhado da área experimental da Embrapa Meio-Norte em Teresina, PI. 2. ed. Teresina: Embrapa Meio-Norte. 41 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/publicacao/1012126/levantamento-zoneamento-e-mapeamento-pedologico-detalhado-da-area-experimental-da-embrapa-meio-norte-em-teresina-pi>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- Melo, R.F., Giongo, V., Deon, D.S. & Anjos, J.B. 2019. Uso e manejo do solo. In: Melo, R.F. & Voltolini, T.V. (ed.) Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido. Brasília: Embrapa. p. 395-444.
- Ortega-Álvarez, R.; Pacheco-Flores, A.; Casas, A. 2022 The “Guamúchil” cultivation in a Mexican cultural landscape: A wild food source for people and birds. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 1-11. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.1020207>
- Paz, A. M., Castanheira, N., Gonçalves, M. C., Fernandes, M., Pires, F., Farzaminan, M., ... & Santos, F. M. (2020). Determinação da salinidade e sodicidade do solo por métodos de indução eletromagnética. *Revista de Ciências Agrárias*, 43(2), 151-160. <https://doi.org/10.19084/rca.18658>
- Pessoa, F. R. A., Pereira, W. E., dos Santos Pessoa, A. M., & de Vasconcelos, E. S. A. G. 2023. Crescimento inicial de mudas de *Spondia tuberosa* irrigadas com água salina. *Revista JRG de Estudos Acadêmicos*, 6(12), 494-513. <https://doi.org/10.55892/jrg.v6i12.531>
- Pessoa, L. G., Freire, M. B. D. S., Green, C. H., Miranda, M. F., de A Filho, J. C., & Pessoa, W. R. 2022. Assessment of soil salinity status under different land-use conditions in the semiarid region of Northeastern Brazil. *Ecological Indicators*, 141, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109139>
- Ranadev, P., Revanna, A., Bagyaraj, D. J., & Shinde, A. H. 2023. Sulfur oxidizing bacteria in agro ecosystem and its role in plant productivity - a review. *Journal of Applied Microbiology*, 134, 1-15. <https://doi.org/10.1093/jambio/txad161>
- Ribeiro, M. R., Ribeiro Filho, M. R., & Jacomine, P. K. T. 2010. Origem e classificação dos solos afetados por sais. In: Gheyi, H.R.; Dias, N.S.; Lacerda, C.F. & Gomes Filho, E. (ed.) Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCTSal. p. 12-19.
- Ricardi, M., & Rosa, H. A. 2018. Desenvolvimento inicial do milho submetido a estresse salino. *Revista Cultivando o Saber*, 1(4), 163-173. Disponível em: https://www.fag.edu.br/upload/revista/cultivando_o_saber/5c1183c0d05f0.pdf. Acesso em: 6 fev. 2022.
- Richards, L. A. (Ed.). 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils (No. 60). US Government Printing Office. https://www.ars.usda.gov/ARSSUserFiles/20360500/hb60_pdf/hb60complete.pdf. Acesso em: 08 ago. 2023
- Sá, F. V. D. S., Araujo, J. L., Novaes, M. C. D., Silva, A. P. D., Pereira, F. H. F., & Lopes, K. P. 2013. Crescimento inicial de arbóreas nativas em solo salino-sódico do nordeste brasileiro tratado com corretivos. *Revista Ceres*, 60, 388-396.
- Santos, P. D. dos, Cavalcante, L. F., Gheyi, H. R., de Lima, G. S., Bezerra, F. T., & Gomes, E. M. 2019. Solo salino-sódico tratado com gesso, fontes orgânicas e lavagem para cultivos sucessivos de girassol e arroz. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(12), 891-899. <http://dx.doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v23n12p891-898>
- Sathishkumar, T. P., Navaneethakrishnan, P., Shivaram, S. V., Kanna, S. S., Rajeshkumar, L., & Rajeshkumar, G. 2023. Characterization of new cellulose fiber extracted from *Pithecellobium dulce* tree. *Applied Science and Engineering Progress*, 16(3), 6845-6845. <http://dx.doi.org/10.14416/j.asep.2023.05.002>
- Severo, P.J. da S., Rocha, J.L.A., Saltos, L.C. dos, Silva, I.A. da, Silva, A.F. da. (2019). Períodos de incubação de enxofre elementar em atributos químicos de um solo salinizado. *Brazilian Journal of Development*, 5(9), 15815-15827. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv5n9-151>

- Silva, A.J. da, Aguiar Netto, A.O., Lucas, A.A.T., Araújo, R.R. de & Sousa, A.F. de. 2020. Reduction of salinity and sodicity of saline-sodic soils under filed condition in Brazilian semi-arid region. *Scientia Plena*, (16)9, 1-14. <http://dx.doi.org/10.14808/sci.plena.2020.090203>
- Silva, C. J. C. da, Santos, R. L. dos, Silva, J. L.F. da, Pereira, M. J., Ataíde, L. D. S. C., & Santos, M. B. da C. 2021. Uso do gesso agrícola na disponibilidade de nutrientes e desenvolvimento de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Revista Geama*, 7(1), 44-51.
- Sousa, F. Q. de, Araújo, J. L., Silva, A. P. da, Pereira, F. H., Santos, R. V. dos, & Lima, G. S. de. 2012. Crescimento e respostas fisiológicas de espécies arbóreas em solo salinizado tratado com corretivos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16, 173-181. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000200007>
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. 2017. Manual de métodos de análise de solo (3 ed.). Embrapa.
- Zhou, H., Shi, H., Yang, Y., Feng, X., Chen, X., Xiao, F., ... & Guo, Y. 2023. Insights into plant salt stress signaling and tolerance. *Journal of Genetics and Genomics*. <https://doi.org/10.1016/j.jgg.2023.08.007>