

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AGRESTE DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL E PASTAGENS**

ANDRÉIA TEIXEIRA DA SILVA

**FORMAS DE FÓSFORO E MANEJO QUÍMICO DE SOLOS AFETADOS POR SAIS
CULTIVADOS COM SORGO FORRAGEIRO**

Garanhuns

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AGRESTE DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL E PASTAGENS

ANDRÉIA TEIXEIRA DA SILVA

FORMAS DE FÓSFORO E MANEJO QUÍMICO DE SOLOS AFETADOS POR SAIS
CULTIVADOS COM SORGO FORRAGEIRO

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de Mestra em Ciência Animal e Pastagens, do Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal e Pastagens da Universidade Federal do Agreste de Pernambuco.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Tavares da Rocha.

Co-orientador: Prof. Dr. João Tiago Correia Oliveira

Área de concentração: Produção Animal.

Garanhuns

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas (SIB-UFAPE)

S586f Silva, Andréia Teixeira da
Formas de fósforo e manejo químico de solos afetados por sais cultivados com sorgo forrageiro / Andréia Teixeira da Silva. – Garanhuns, PE, 2024.
75 f. : il.

Orientador(a): Alexandre Tavares da Rocha.
Coorientador(a): João Tiago Correia Oliveira.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal e Pastagens, Garanhuns, PE, BR-PE, 2024.

Inclui referências.

1. Resíduos orgânicos 2. Solos - Salinidade 3. Solos - Teor de fósforo 4. Sorgo I. Rocha, Alexandre Tavares da (orient.) II. Oliveira, João Tiago Correia (coorient.) III. Universidade Federal do Agreste de Pernambuco Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal e Pastagens IV. Título

CDD 631.41

ANDREIA TEIXEIRA DA SILVA

**FORMAS DE FÓSFORO E MANEJO QUÍMICO DE SOLOS AFETADOS POR SAIS
CULTIVADOS COM SORGO FORRAGEIRO**

Dissertação apresentada como parte das exigências para obtenção do título de Mestra em Ciência Animal e Pastagens, do Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal e Pastagens da Universidade Federal do Agreste de Pernambuco.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Tavares da Rocha.

Co-orientador: Prof. Dr. João Tiago Correia Oliveira

Área de concentração: Produção Animal.

Aprovado (a) em: 30/ 07/ 2024.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Alexandre Tavares da Rocha
(Orientador)

Dra. Maria Camila de Barros Silva
(Examinadora externa -UFAPE)

Dra. Rayanne Thalita de Almeida Souza
(Examinadora externa-ETE)

DEDICATÓRIA

A Deus e à minha querida mãe Maria, dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, fonte de toda a graça e sabedoria, pela força, discernimento e perseverança que me permitiram chegar até aqui. Sua providência e misericórdia me sustentaram na superação dos desafios e obstáculos ao longo desta jornada.

Aos meus pais Maria e Cicero, que nunca mediram esforços para nos oferecer a formação que não receberam, que sob árduo trabalho da lida da agricultura me fizeram chegar aqui, cuja dedicação, apoio e incentivo foram fundamentais para a concretização deste sonho. Suas palavras de encorajamento e amor incondicional me deram a motivação necessária para seguir em frente. Aos meus irmãos André, Andreline e Alessandro, por estarem sempre ao meu lado, oferecendo ajuda, compreensão, descontração e suporte em todos os momentos. As minhas tias que acompanharam todo esse processo.

Ao meu orientador, professor Alexandre, cuja orientação, paciência e conhecimento foram indispensáveis para a realização deste trabalho, agradeço por acreditar em meu potencial e me guiar com excelência durante toda a pesquisa, por cada conselho, por cada dia que cheguei em sua sala desanimada e era recebida com uma boa conversa, levarei cada palavra comigo, e junto do meu coorientador João Tiago pela ajuda, por me ensinar e corrigir, obrigada pela oportunidade.

E, finalmente, aos meus amigos, que me proporcionaram momentos de descontração e alegria, e que sempre estiveram prontos para me apoiar, especialmente nos momentos mais desafiadores desta jornada, em especial Andressa, minha amiga de graduação e que dividimos cada dia dessa fase, das mudanças, dos dias frios e do café na sanduicheira, dividimos as despesas, o lar, as preocupações, mas dividimos muitas alegrias e conquistas, como sempre falei Deus me enviou anjos nesse período, aos meus amigos Lucas e Alycia por toda paciência, foi uma benção dividir a casa e esse momento com vocês, a Ruth, minha amiga e irmã de graduação, cuja presença, sempre estive ao meu lado, mesmo distante. O apoio, encorajamento e amizade inestimável foram essenciais.

Aos colegas da Pós-graduação, pela ajuda, tornando meus dias mais leves durante esse ciclo, e os levarei no meu coração, as minhas amigas da graduação Taís e Beatriz que tornaram minha chegada a universidade mais tranquila, que estão comigo desde o primeiro dia de Ninp, vocês são incríveis meninas, sabem disso.

A todos, minha eterna gratidão.

RESUMO

A salinidade dos solos é um dos principais desafios globais para a agropecuária, comprometendo a produtividade. Esta pesquisa investigou a fertilidade de solos salinos para o cultivo de sorgo, com foco na disponibilidade de fósforo (P) e na correção da salinidade causada por magnésio (Mg). No primeiro experimento, conduzido em Cambissolos de Serra Talhada (PE), foram aplicadas doses crescentes de fósforo (0, 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅) a solos cultivados com sorgo. Após 50 dias, analisou-se o fósforo disponível usando diferentes extratores (Mehlich-1, Olsen, Chang & Jackson, Saunder, Soltanpour e Pox), além do fracionamento químico do fósforo inorgânico. Os resultados indicaram a ausência da fração mais lábil de P, com predominância de frações não-lábeis. No solo 1 (CAMBISSOLO Flúvicos eutróficos), a fração P-Cálcio-estável foi predominante (54%), enquanto nos solos 2 e 3, o P residual dominou (82% e 59%, respectivamente). No solo 4, a fração P-Ferro não lábil foi a mais relevante (53%). A análise de componentes principais revelou que as frações de P-óxidos de Fe e Al se correlacionaram com a disponibilidade de P no solo 2. No geral, o fracionamento mostrou uma predominância de P em frações não-lábeis, sem correlação significativa entre o P extraído pelos métodos e a sua disponibilidade para as plantas, inclusive nos extratores recomendados para solos alcalinos, como o de Olsen, que se mostrou ineficaz. No segundo experimento, realizado com solos de Altinho (PE), classificados como PLANOSSOLO Háptico Eutrófico solódico, o foco foi a correção da salinidade causada por Mg. Os tratamentos aplicados foram: gesso agrícola, lodo de laticínios, humato comercial, lodo + gesso, humato + gesso, biochar (cama de frango) e testemunha. Foram realizados dois ciclos de 60 dias, com solo e plantas avaliados em cada ciclo. No primeiro ciclo, os tratamentos com lodo de laticínios (41,69%), gesso (43,05%) e lodo + gesso (43,90%) reduziram significativamente a saturação de Na+Mg, em comparação com a testemunha (49,11%). No segundo ciclo, lodo + gesso (53,14%) e lodo de laticínios (53,32%) mantiveram essa redução. Houve aumento dos teores de Na nos tratamentos com condicionadores, além de uma redução significativa do magnésio trocável. Após 120 dias, a condutividade elétrica também foi significativamente menor com o uso dos condicionadores. As características morfológicas e fisiológicas do sorgo, como altura, número de folhas, perfilhos, largura e comprimento das folhas, peso verde e seco, foram significativamente melhoradas. O comprimento da maior raiz e o peso seco das raízes também foram superiores em comparação à testemunha em ambos os ciclos. Os resultados confirmam a eficácia dos condicionadores orgânicos na melhoria de solos afetados por magnésio, com efeitos positivos na estrutura e desenvolvimento das plantas. Contudo, a baixa eficiência dos extratores de fósforo para solos salinos e alcalinos indica a necessidade de mais estudos para adequar as técnicas de análise da disponibilidade de P nesses tipos de solo.

Palavras-chave: Fracionamento de fósforo; Saturação por magnésio; Resíduos orgânicos; Sorgo sudão.

ABSTRACT

Soil salinity is one of the major global challenges for agriculture, threatening soil productivity. This study aimed to assess the fertility of saline soils for sorghum cultivation, focusing on phosphorus (P) availability and correcting salinity caused by magnesium (Mg). In the first experiment, conducted on Cambisols from Serra Talhada (PE, Brazil), increasing doses of phosphorus (0, 30, 60, 90, and 120 kg ha⁻¹ of P₂O₅) were applied to sorghum-cultivated soils. After 50 days, available P was analyzed using different extractors (Mehlich-1, Olsen, Chang & Jackson, Saunder, Soltanpour, and Pox), followed by the inorganic phosphorus fractionation. Results indicated the absence of labile P fractions, with non-labile fractions predominating. In soil 1 (Fluvic Cambisols), the predominant fraction was Ca-bound P (54%), while in soils 2 and 3, residual P dominated (82% and 59%, respectively). In soil 4, Fe-bound P was the most significant fraction (53%). Principal component analysis revealed that Fe and Al oxide-bound P fractions correlated with P availability in soil 2. Overall, fractionation showed a predominance of P in non-labile fractions, with no significant correlation between the extracted P and plant availability, including for extractors recommended for alkaline soils like Olsen, which proved ineffective. In the second experiment, conducted on Planosols from Altinho (PE, Brazil), the focus was on correcting Mg-induced salinity. Treatments included agricultural gypsum, dairy sludge, commercial humate, sludge + gypsum, humate + gypsum, biochar (poultry litter), and a control. Two cycles of 60 days each were conducted, with soil and plants evaluated at the end of each cycle. In the first cycle, treatments with dairy sludge (41.69%), gypsum (43.05%), and sludge + gypsum (43.90%) significantly reduced Na+Mg saturation compared to the control (49.11%). In the second cycle, sludge + gypsum (53.14%) and dairy sludge (53.32%) maintained these reductions. The treatments increased Na content and significantly reduced exchangeable Mg. After 120 days, electrical conductivity was also significantly lower with the conditioners. Sorghum's morphological and physiological characteristics, such as height, number of leaves, tillers, leaf width and length, and fresh and dry weight, improved significantly. Root length, root dry weight, and fresh root weight were also higher in treated plants compared to the control in both cycles. The results confirm the effectiveness of organic conditioners in improving Mg-affected soils, with positive impacts on plant growth and development. However, the inefficiency of phosphorus extractors for saline and alkaline soils highlights the need for further research to optimize techniques for evaluating P availability in such soils.

Keywords: Phosphorus fractionation; Magnesium saturation; Organic residues; Sudan grass.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1 – FORMAS E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS AFETADOS POR SAIS DO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO

Figura 1. Análise de componentes principais de variáveis relacionadas com as frações (mg kg⁻¹) de P e os atributos dos Cambissolos Flúvicos eutróficos, solos 1 e 2, e dos Cambissolos Alcalinos, os solos 3 e 4..... 33

Figura 2. Análise de componentes principais de variáveis relacionadas com os extratores (mg kg⁻¹) de P disponível e as frações de fósforo nos Cambissolos Flúvicos eutróficos, solos 1 e 2, e dos Cambissolos Alcalinos, os solos 3 e 4. 34

ARTIGO 2 – CARACTERIZAÇÃO E CORREÇÃO DE SOLOS AFETADOS POR MG PARA A PRODUÇÃO DE SORGO FORRAGEIRO NO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO.

Figura 1. Análise de componente principal (CP) por ciclo de coleta das características química e física dos solos afetados por sais e aplicados diferentes condicionadores de salinização minerais e orgânicos, aos 60 dias de cada ciclo. 58

Figura 2. Análise de componente principal (CP) por ciclo de coleta das variáveis morfológicas e fisiológicas de plantas de sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.)), aos 60 dias de cada ciclo, após a germinação, sob o cultivo em solos afetados por sais e aplicados diferentes condicionadores de salinização minerais e orgânicos. 66

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1 – FORMAS E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS AFETADOS POR SAIS DO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO

- Tabela 1.** Características químicas e físicas das amostras dos CAMBISSOLOS Flúvicos eutróficos, solos 1 e 2, e dos CAMBISSOLOS Alcalinos, os solos 3 e 4. 29
- Tabela 2.** Sequência e procedimento do fracionamento de P e formas de P alvo..... 31
- Tabela 3.** Coeficientes de correlação de Pearson entre os teores das frações de P inorgânico e características dos solos. 34
- Tabela 4.** Teores das diferentes frações e do P total em g/dm^3 e porcentagem de cada fração de P nos solos em relação ao fósforo total (%). 35
- Tabela 5.** Coeficientes de correlação linear simples entre os teores das frações de P inorgânico do solo e os teores de P extraídos do solo por vários extratores e pela planta no Cambissolos Flúvicos eutróficos 1 e 2..... 37
- Tabela 6.** Modelos de Equação de regressão linear simples obtidos a partir das aplicações de doses de P e aos extratores e sua relação com P acumulado na parte aérea (PA), nos Cambissolos Flúvicos eutróficos 1 e 2, com seus respectivos coeficientes de determinação. 38

ARTIGO 2 – CARACTERIZAÇÃO E CORREÇÃO DE SOLOS AFETADOS POR MG PARA A PRODUÇÃO DE SORGO FORRAGEIRO NO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO.

- Tabela 1.** Propriedades químicas e físicas das amostras de solo analisadas. 54
- Tabela 2.** Caracterização do lodo de laticínios..... 54
- Tabela 3.** Caracterização química e física de um solo afetado por magnésio na presença de condicionadores orgânicos e minerais (lodo de laticínios, gesso, lodo + gesso, comercial, comercial + gesso, biochar e testemunha) no período de 60 dias (Ciclo 1) e 120 dias. 59
- Tabela 4.** Comparação entre grupos de médias por contraste ortogonal por ciclo de coleta das características químicas e físicas de um solo afetado por magnésio na presença dos tratamentos lodo de laticínios, gesso, lodo + gesso, comercial, comercial + gesso, biochar e testemunha no período de 60 dias (Ciclo 1) e 120 dias (Ciclo 2). 64

Tabela 5. Comparação entre grupos de médias por contraste ortogonal por ciclo de coleta das características morfológicas e fisiológicas de plantas de sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.)), aos 60 dias de cada ciclo, após a germinação, sob o cultivo de solos afetados por Mg e aplicados diferentes condicionadores de salinização minerais e orgânicos (Lodo de laticínio, Lodo de laticínio+Gesso, Biochar, Gesso, Produto comercial+Gesso, Produto comercial e Testemunha)..... 65

Tabela 6. Características morfológicas e fisiológicas de plantas de sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.)) cultivado em solos afetados por sais e aplicados diferentes condicionadores de salinização minerais e orgânicos..... 67

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. Geral:	14
2.2. Específicos:	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1. Sorgo Forrageiro: Classificação Botânica, origem e características gerais	15
3.2. Solos saturados por Magnésio	16
3.3. Disponibilidade de fosforo	19
3.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21
4. ARTIGO 1	25
4.1. INTRODUÇÃO	27
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	28
4.3. RESULTADOS	32
4.4. DISCUSSÃO	38
4.5. CONCLUSÃO	43
4.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
5. ARTIGO 2	50
5.1. INTRODUÇÃO	52
5.2. MATERIAL E MÉTODOS	53
5.3. RESULTADOS	57
5.4. DISCUSSÃO	68
5.5. CONCLUSÃO	71
5.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
6. CONSIDERAÇÕES GERAIS	76

1. INTRODUÇÃO

O excesso de sais no solo é um fenômeno comum em regiões áridas e semiáridas e constitui um fator crítico no processo de desertificação, sendo a principal causa da redução da produtividade agrícola global. Esse problema é evidente no Semiárido Brasileiro e em parte do Agreste de Pernambuco, onde os altos níveis de salinidade são prevalentes. A origem desses processos pode ser atribuída a condições naturais, como clima, topografia e características pedológicas, e as atividades antrópicas, incluindo práticas de manejo inadequado do solo, como o uso excessivo de fertilizantes e irrigação com água salina (Stavi et al., 2021; Ribeiro et al., 2016).

O excesso de sais influencia o crescimento das plantas, manifestando-se diretamente através de efeitos na absorção de água e na disponibilidade de nutrientes, além de poder levar ao desequilíbrio da estrutura física do solo, afetando a infiltração de água e a retenção de nutrientes.

Além dos fatores mencionados, o excesso de magnésio (Mg) no solo pode ser uma causa significativa de salinização. Solos com altos níveis de magnésio são propensos à deterioração da estrutura física, tornando-se menos permeáveis e mais suscetíveis à compactação. Este fenômeno pode resultar em uma menor infiltração de água e um aumento no escoamento superficial, exacerbando problemas de salinização. Nas plantas, o excesso de Mg^{2+} celular leva à substituição de Ca^{2+} e K^+ , causando um comprometimento na estabilidade da parede celular e na permeabilidade da membrana celular.

Entre os nutrientes essenciais para as plantas, o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K) são necessários em grandes quantidades para vários processos fisiológicos. N e P são particularmente limitantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas, pois frequentemente estão presentes em pequenas quantidades ou em formas não facilmente disponíveis (Mehnaz et al., 2019).

Solos áridos e semiáridos possuem menor disponibilidade de P em comparação com regiões úmidas, devido ao baixo teor total de P e à alta precipitação de P no solo. Nessas regiões, a disponibilidade limitada de água impede a lixiviação de sais, resultando na acumulação de minerais de cálcio (Ca). Assim, a maior parte do P solúvel dos fertilizantes é rapidamente convertida em formas menos disponíveis (Nóbrega et al., 2024; Ding et al., 2020).

A demanda por cultivares que demonstrem capacidade de tolerância a solos com elevados níveis de salinidade é de extrema importância. O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.)), amplamente utilizado na alimentação humana e animal, destaca-se por seu potencial para contribuir à segurança alimentar, devido à sua notável adaptabilidade a condições de seca e a solos com alta concentração de sais (Amombo et al., 2022). Embora o sorgo seja recomendado para cultivo em ambientes salinos, sua tolerância ao sal pode ser melhorada pelo uso de remediadores de salinidade (Hurtado et al., 2020).

Para a remediação da salinidade, a utilização de condicionadores de solo é uma prática eficaz para melhorar o crescimento das plantas, a qualidade do solo e reduzir a necessidade de fertilizantes químicos. Estes condicionadores ajudam a reduzir a concentração de sais no solo, aumentar a disponibilidade de nutrientes e promover um ambiente mais favorável ao desenvolvimento e crescimento vegetal. Alguns dos principais condicionadores de solo incluem resíduos da indústria láctea como o lodo de laticínio, biochar e resíduos orgânicos.

Esses materiais melhoram a estrutura do solo, aumentam a capacidade de retenção de água e nutrientes, e reduzem a salinidade, criando um ambiente mais propício ao crescimento vegetal. Por exemplo, o lodo de laticínio fornece matéria orgânica e nutrientes essenciais; o biochar aumenta a porosidade, melhora a infiltração e adsorve íons; e os resíduos orgânicos promovem maior atividade microbiana, que decompõe a matéria orgânica e libera nutrientes (Harlia et al., 2024; Babla et al., 2022; Font-Palma, 2019; Schlegel et al., 2015). Silva et al. (2021), observaram que a aplicação de matéria orgânica e enxofre elementar em solos irrigados com água salina promoveu um aumento nas formas de fósforo dissolvido na solução do solo, além de influenciar positivamente as propriedades químicas do solo e o crescimento do sorgo forrageiro.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral:

Avaliar a disponibilidade de fósforo em solos salinizados, por meio do fracionamento das suas formas e da correlação com o fósforo disponível obtido por diferentes extratores. Além disso, analisar o impacto da saturação por magnésio na fertilidade do solo e na produtividade do sorgo forrageiro em solos do Agreste de Pernambuco, bem como a eficácia do uso de condicionadores orgânicos e minerais na remediação dessa saturação.

2.2. Específicos:

- Avaliar o melhor extrator para o P-disponível e avaliar as formas de P predominantes;
- Avaliar o impacto da saturação por magnésio sobre atributos físico hídricos do solo;
- Comparar os efeitos dos condicionadores de salinização, minerais e orgânicos, em solo com saturação por Mg nas características morfológicas do sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.));

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Sorgo Forrageiro: Classificação Botânica, origem e características gerais

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é uma espécie pertencente à família Poaceae, gênero *Sorghum*, sendo uma das gramíneas mais importantes para a alimentação humana e animal. O sorgo é originário da África, mas se adaptou a diferentes condições climáticas, o que facilitou sua disseminação para outras regiões tropicais e subtropicais do mundo, como Índia, Sudeste Asiático e América Latina (Yusriani et al., 2024). O sorgo é uma das principais culturas alimentares de cereais, ocupando o quinto lugar depois do arroz, trigo, milho e cevada em termos de importância e produção (Ahmed et al., 2024).

No Brasil a produção de sorgo tem mostrado um crescimento expressivo nos últimos anos. Em 2023, a produção do cereal aumentou de maneira notável, registrando um incremento de 53,4% em relação ao ano anterior, ultrapassando 4 milhões de toneladas anuais (IBGE, 2023).

Historicamente, a cultura do Sorgo chegou ao Brasil com os escravos por volta de 1600, comercialmente o sorgo começou a ser utilizada a partir de 1960, primeiramente como produção de grão e silagem. A cultura do sorgo, no Brasil, apresentou avanço significativo a partir da década de 70 (Ruas et al., 1982).

Agronomicamente o sorgo é classificado em 5 grupos: granífero, sacarino, forrageiro, vassoura e biomassa. O primeiro grupo inclui tipos de porte baixo adaptados à colheita mecânica. O segundo grupo inclui tipos de porte altamente adequada para fabricação de silagem e/ou como alternativa para produção de açúcar e álcool. O sorgo forrageiro é utilizado principalmente para ser fornecido no cocho como fonte de volumoso, complemento alimentar para gado. O grupo de sorgo do tipo vassoura é usado para confecção de vassouras, e o grupo de biomassa é destinado à produção de energia, com poder calorífico similar ao da cana, do eucalipto e do capim elefante (Embrapa et al., 2021).

O sorgo como cultura forrageira vêm preenchendo a necessidade de forragem verde durante o verão, pois apresenta melhor eficiência do uso da água e adaptações resistentes à seca, e podem tolerar condições salinas, além de apresentar um ciclo de crescimento relativamente curto, e ser uma alternativa de segunda safra a depender da região (Yusriani et al., 2024; Oresca et al., 2021; Fernandes et al., 2020).

O sorgo é amplamente utilizado na alimentação animal, sendo aproveitado como silagem, para corte verde e fornecimento no cocho, devido à sua boa digestibilidade, alto teor

energético e elevada produtividade (Bhat, 2019). Em algumas regiões, condições climáticas e características do solo menos favoráveis ao milho (*Zea mays* L.) o sorgo é a opção preferida para a produção de silagem (Pupo et al., 2022). Como uma planta de ciclo C4, o sorgo apresenta alta eficiência na conversão de energia em biomassa seca, alcançando produtividades entre 8,9 a 39,5 Mg ha⁻¹ em um período de 90 dias (Irawan 2022, Silva et al., 2021).

Silva et al. (2023), ao avaliar o desenvolvimento do sorgo cultivado com água salina e adubação orgânica, observou que o incremento da matéria orgânica diminuiu os efeitos nocivos da salinidade para as variáveis: diâmetro de colmo, massa da matéria verde e matéria seca das plantas e a matéria seca das raízes, apresentando um desenvolvimento semelhante em ambos os tratamentos, demonstrando ser uma alternativa na atenuação do estresse provocado.

3.2. Solos saturados por Magnésio

De acordo com o Instituto Nacional Do Semiárido (INSA), a diversidade de composições e morfologias dos solos do Semiárido brasileiro é imensa. Solos rasos e pouco profundos (de 50 cm a 100 cm), geralmente pedregosos, contrastam com solos mais profundos e desenvolvidos, geralmente argilosos e com elevada reserva de nutrientes; ainda, solos arenosos e com baixa fertilidade. Os principais solos dominantes nas divergentes paisagens do Semiárido brasileiro são os Argissolos, Cambissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos e Planossolos (Gomes et al., 2019)

Regiões áridas e semiáridas são caracterizadas por uma baixa quantidade de matéria orgânica e nutrientes no solo, causando, má estrutura, propensão ao acúmulo de sais, déficit hídrico, temperatura extrema e dessecação (Soussi et al., 2016).

Uma característica do solo saturados por sais é a baixa atividade de íons nutrientes (macronutrientes como N, P, K, e micronutrientes como Fe, Mn, Zn e Cu) devido às proporções extremas de Na⁺/Ca²⁺, Na⁺/K⁺, Ca²⁺/Mg²⁺ na solução do solo, que afetam a absorção de nutrientes da planta e seu crescimento (Bidalia et al., 2019).

O pH, a porcentagem de sódio trocável (PST), a condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) e relação de adsorção de sódio (RAS) são algumas das propriedades químicas utilizadas para classificar os solos afetados por sais. Os valores específicos para distinguir estes solos foram estabelecidos pelo United States Salinity Laboratory (USSL) (Staff, 1954) mostrado na tabela 1.

Tabela 1. Sistema de classificação de solos afetados por sais segundo United States Salinity Laboratory Staff

Solo	pH	PST	CEes	RAS
Salino	<8,5	<15%	>4 dS m ⁻¹	<13
Salino-sódico	< ou = 8,5	> ou = 15%	>4 dS m ⁻¹	>ou = 13
Sódico	Entre 8,5 e 10	> ou = 15%	<4dS m ⁻¹	>ou = 13

PST- Percentagem de sódio trocável; CEes- Condutividade elétrica do extrato da pasta de saturação do solo; RAS-Relação de adsorção de Na.

Os prejuízos do acúmulo de sais ao desenvolvimento das plantas se devem a efeitos osmóticos, tóxicos e nutricionais. O efeito osmótico causa redução na absorção de água pelas plantas; o efeito de íons específicos ou excesso de íons tóxicos faz com que entrem no fluxo de transpiração, podendo causar danos às folhas, alteração da integridade estrutural e funcional da membrana plasmática e inibir a atividade de enzimas vitais ao metabolismo, causando redução no crescimento ou prejudicando a absorção de elementos essenciais (Rajabi Dehnavi et al., 2020)

As plantas têm vários mecanismos para lidar com o excesso de sais , todos os quais requerem energia adicional e, portanto, impactam negativamente o crescimento das plantas (Litalien e Zeeb, 2020).

Altos níveis de sais, tanto no Brasil quanto em outros países, ocorrem naturalmente em classes de solos como Planossolos, Neossolos, Vertissolos, Gleissolos e Cambissolos (Ribeiro et al., 2016). No Agreste de Pernambuco, essas classes de solos são caracterizadas por limitações de fertilidade e/ou propriedades físicas.

A caracterização dos solos afetados por sais apenas pela condutividade elétrica ou indicadores relacionados ao sódio pode ser insuficiente para identificar a degradação por salinização. Estudos com amostras de solo da Austrália demonstram que altos níveis de magnésio também desempenham um papel crucial na degradação do solo. Em solos australianos, saturações por magnésio superiores a 25% e saturações por sódio inferiores a 5% (Garcia, 2003) indicam que a combinação desses dois cátions pode causar significativa degradação estrutural e perda de produtividade.

Esse fenômeno é comparável ao observado nos solos do Agreste de Pernambuco, onde a interação entre magnésio e sódio contribui para a deterioração das propriedades físicas e a redução da produtividade agrícola. Estudos recentes demonstraram que níveis elevados de magnésio no solo podem levar à degradação da estrutura do solo semelhante aos efeitos

causados pelo sódio. Os cátions predominantes que influenciam a agregação e a estrutura do solo são Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} . O magnésio, em virtude de suas propriedades iônicas (maior raio de hidratação e menor poder de floculação do que o Ca), pode deteriorar a qualidade estrutural do solo dispersando partículas de argila e promover a quebra de agregados, quando presente como o cátion em concentrações extremamente altas no solo (Chaganti e Culman 2017).

Níveis elevados de magnésio nos solos podem ocorrer naturalmente, em função da mineralogia e também como resultado da irrigação de culturas com resíduos, efluentes ou água reciclada (Mthimkhulu, et. al, 2018).

Embora o magnésio já tenha surgido como um critério diagnóstico da salinidade junto com o sódio, a ‘salinidade por magnésio’ ainda não foi claramente definida e solos com alto teor de magnésio, e muitas vezes, não são envolvidos no diagnóstico da salinidade, seja como causa ou potencializador dos problemas do excesso de sódio. Alguns autores sugerem a avaliação da saturação por magnésio como indicador da salinidade do solo e chegam a propor que os solos sejam classificados como salinizado por Magnésio a partir de valores da saturação por magnésio (Andreeva, et. al. 2020).

De acordo com Qadir et al. (2018) seguindo a terminologia “afetados pelo sal”, para solos com concentrações excessivas de sais, os solos com alto teor de magnésio pode ser referidos como “afetados por magnésio” ou, seguindo a terminologia, “sódicos”, para solos com altas concentrações de sódio trocável, solos com alto teor de magnésio também pode ser chamados de “magnésicos”.

O princípio de remediação e o manejo dos solos afetados pelo magnésio seguem os mesmos princípios que se aplicam aos solos sódicos; ou seja, aumentar os níveis de cálcio no solo para aliviar os efeitos do excesso de magnésio, sódio ou qualquer cátion em excesso, sendo o gesso é o principal produto nesse fim.

Uma forma de atuação crescente na atenuação da salinidade, de modo geral, é o uso de produtos e resíduos orgânicos. A aplicação de resíduos orgânicos como esterco têm impactos benéficos sobre propriedades físicas, químicas, nutricionais e biológicas de solos salinos, salino-sódicos e sódicos (Eckhardt et al., 2020; Srivastava et al., 2012). A aplicação de produtos orgânicos pode, por exemplo, aumentar a dissolução de minerais da calcita (CaCO_3) nativa através do aumento da formação de ácido carbônico no solo, atuando na liberação do

Ca²⁺ na solução do solo para facilitar na remoção do Na⁺ do complexo de troca (Rezapour et al., 2022).

Em um estudo conduzido em casa de vegetação, Silva et al. (2021) avaliaram o efeito do gesso agrícola na disponibilidade de bases trocáveis, na saturação por Al³⁺ (m) e no desenvolvimento do sorgo (variedade de sorgo forrageiro SF 15, fornecida pelo IPA-PE) em um Latossolo Amarelo da Chapada do Araripe, PE. Observou-se que a aplicação de gesso agrícola aumentou a concentração de Ca²⁺ na superfície do solo, além de promover um incremento significativo na massa fresca e na matéria seca do sorgo forrageiro.

3.3. Disponibilidade de fosforo

O excesso de sais impactam o crescimento das plantas diretamente por meio dos efeitos na absorção de água pelas plantas, na disponibilidade de nutrientes para as plantas e pela imposição de toxicidade às plantas, e deteriora as condições físicas do solo (Stavi et al., 2021). A principal consequência do estresse salino nas plantas é o acúmulo excessivo de Na⁺ e Cl⁻, que perturba a homeostase iônica e causa fitotoxicidade, estresse osmótico, causando seca fisiológica, e interrupção da fotossíntese, que causa desequilíbrio de nutrientes (Amombo et al., 2022).

Propriedades físico-químicas do solo, como pH, textura e conteúdo de matéria orgânica determinam a reação de sorção de fósforo (Xiong et al., 2022). A salinização pode levar ao aumento do pH do solo, tornando-o alcalino. Solos alcalinos podem ter baixa disponibilidade de nutrientes essenciais, como ferro, manganês e fósforo, e podem afetar negativamente a atividade microbiana do solo. A presença de compostos orgânicos pode diminuir a capacidade de adsorção do P no solo. A matéria orgânica pode agir recobrando os grupos funcionais dos argilominerais e óxidos causando um impedimento físico à adsorção do P (Rheinheimer et al., 2020).

Pavinato et al. (2020) ao realizar um mapeamento da distribuição espacial das concentrações totais de P em solos brasileiros, constataram que as maiores concentrações estão predominantemente associadas aos Latossolos e Nitossolos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SIBCS), assim como aos Inceptissolos (Cambissolos, de acordo com o Soil taxonomy), que se desenvolvem sobre material de origem apático, caracterizado por elevada presença de P, argila, Fe e/ou Al, e uma capacidade significativa de adsorção de P, conforme relatado por Santos et al. (2018) e Rodrigues et al. (2016).

Na perspectiva química, os solos do Semiárido brasileiro apresentam pH variando entre moderadamente ácidos a moderadamente neutros, com boa disponibilidade de nutrientes, exceto o fósforo os solos dessa região apresentam baixa disponibilidade de fósforo lábil, um agravante na queda de produtividade (Alves et al., 2022). Estudar as frações e suas particularidades, é quantificar a renovação dos reservatórios inorgânicos de fósforo (P) no solo, essencial na compreensão da ciclagem do P nos sistemas solo-planta (Helfenstein et al., 2020).

Muitas técnicas analíticas para caracterização de P no solo apresentam vantagens, desvantagens, e particularidades, para um estudo abrangente, nenhuma técnica por si só é suficiente, mas também que nenhum método deve ser completamente excluído, mas sim analisar as limitações e oportunidades do fracionamento de P, considerando toda a diversidade de compostos de P nos solos (Gu e Margenot, 2021).

3.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, Hygor Kristoph Muniz Nunes et al. Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no Semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 1, p. 373-392, 2022.
- AMOMBO, E., ASHILENJE, D., HIRICH, A. et al. Exploring the correlation between salt tolerance and yield: research advances and perspectives for salt-tolerant forage sorghum selection and genetic improvement. **Plant**, 255, 71, 2022.
- ANDREEVA, N. et al. Determination of magnesium salinity in belozem region, Bulgaria. **Bulgarian Journal of Soil Science**, v.5, n.1, p.11-22, 2020.
- BABLA, M. et al. Value-added products as soil conditioners for sustainable agriculture. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 178, p. 106079, 1 mar. 2022.
- BHAT, B. Venkatesh. Breeding forage sorghum. In: **Breeding Sorghum for Diverse End Uses**. Woodhead Publishing, 2019. p. 175-191.
- BIDALIA, ANKITA et al. Effect of salinity on soil nutrients and plant health. **Salt Stress, Microbes, and Plant Interactions: Causes and Solution: Volume 1**, p. 273-297, 2019.
- CHAGANTI, Vijayasatya N.; CULMAN, Steve W. Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. **Crop, Forage & Turfgrass Management**, v. 3, n. 1, p. 1-7, 2017.
- DING, Zheli et al. The integrated effect of salinity, organic amendments, phosphorus fertilizers, and deficit irrigation on soil properties, phosphorus fractionation and wheat productivity. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 2736, 2020.
- ECKHARDT, Daniel Pazzini et al. Utilização de fertilizantes orgânicos a base de esterco bovino na produção de alface. **Observatório De La Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 3, p. e3701-e3701, 2024.
- EMBRAPA- Melhoria genética do sorgo para o semiárido brasileiro. In: MENEZES, C. B. Melhoria genética de sorgo: capítulo 11. **Brasília: Embrapa**, 2021, p. 293-340. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1138380>.
- FERNANDES, Patrick Bezerra et al. Aspectos relacionados ao potencial forrageiro do sorgo: revisão. **Pubvet**, v. 14, p. 119, 2020.
- FONT-PALMA, CAROLINA. Methods for the treatment of cattle manure—a review. **C**, v. 5, n. 2, p. 27, 2019.
- GARCIA, Jose Luiz M. **Equilíbrio de Bases Adequado e Fertilidade Agrícola**. 2003.
- GOMES, L. C., Faria, R. M., de Souza, E., Veloso, G. V., Schaefer, C. E. G. R., Filho, E. I. F. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. **Geoderma**, 340, 2019, 337–350
- GU, Chunhao; MARGENOT, Andrew J. Navigating limitations and opportunities of soil phosphorus fractionation. **Plant and Soil**, v. 459, n. 1, p. 13-17, 2021.
- HARLIA, E. et al. Utilization of dried dairy cow feces as biogas substrate and biogas sludge as organic soil conditioner. **Magna Scientia Advanced Biology and Pharmacy**, v. 11, n. 1, p. 044–050, 2024.

- HELFENSTEIN, Julian et al. Estimates of mean residence times of phosphorus in commonly considered inorganic soil phosphorus pools. *Biogeosciences*, v. 17, n. 2, p. 441-454, 2020.
- HURTADO, Alexander Calero et al. Different methods of silicon application attenuate salt stress in sorghum and sunflower by modifying the antioxidative defense mechanism. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 203, p. 110964, 2020.
- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola: Estatística da produção agrícola dezembro 2023. Brasília: IBGE, 2024.
- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Levantamento Sistemático da Produção Agrícola: tabela 4 -produção de cereais, leguminosas e oleaginosas -comparação entre as safras 2022 e 2023. Brasília: IBGE, 2023.
- INSA. Instituto Nacional do Semiárido. O Semiárido brasileiro. Disponível em: <https://www.gov.br/insa/pt-br/semiario-brasileiro>.
- IRAWAN, Fanny Yulia et al. Potential Development of Sorghum Plants (*Sorghum bicolor* L. Moench) as Alternative Animal Feed in South Konawe Regency. **In: International Conference on Improving Tropical Animal Production for Food Security (ITAPS 2021)**. Atlantis Press, 2022. p. 329-334.
- LAMICHHANE, SUMAN; TARPLEY, LEE; DOU, FUGEN. Impact of Excess Magnesium Salt Supply on Rice Yield, Physiological Response, and Grain Mineral Content. *Sustainability*, v. 15, n. 22, p. 15741, 2023.
- LITALIEN, A. E ZEEB, B. (2020). Curando a Terra: Uma Revisão da Salinização Antrópica do Solo e Estratégias Baseadas em Plantas para Mitigação Sustentável. **Ciência. Meio Ambiente Total**. 698, 134235. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134235.
- MEHNAZ, K. R.; KEITEL, C.; DIJKSTRA, F. A. Phosphorus availability and plants alter soil nitrogen retention and loss. *Science of The Total Environment*, v. 671, p. 786-794, jun. 2019.
- MTHIMKHULU, S. S. et al. The magnesium status of soils supporting sugarcane production in Central and Southern Africa. 2018.
- NÓBREGA, JACKSON S. et al. Photosynthetic pigments, growth, and production of cherry tomato under salt stress and hydrogen peroxide. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, p. e275968, 2024.
- ORESCA, Denizard et al. Desempenho agrônômico de sorgo forrageiro e milho cultivados sob irrigação com água salina e doses de nitrogênio no semiárido Brasileiro. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. e359101018976-e359101018976, 2021.
- PAVINATO, Paulo Sergio et al. Map of total phosphorus content in native soils of Brazil. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 6, p. e20200077, 2020.
- PUPO, M. R.; WALLAU, M. O.; FERRARETTO, L. F. Effects of season, variety type, and trait on dry matter yield, nutrient composition, and predicted intake and milk yield of whole-plant sorghum forage. *Journal of Dairy Science*, v. 105, n. 7, p. 5776-5785, 2022.
- QADIR, M. et al. High-magnesium waters and soils: Emerging environmental and food security constraints. *Science of The Total Environment*, v. 642, p. 1108-1117, nov. 2018.

RAJABI DEHNAVI, Ahmad et al. Effect of salinity on seed germination and seedling development of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) genotypes. **Agronomy**, v. 10, n. 6, p. 859, 2020.

REZAPOUR, S. et al. Organic amendments improved the chemical–nutritional quality of saline-sodic soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 19, n. 6, p. 4659-4672, 2022.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Ciclo biogeoquímico do fósforo, diagnóstico de disponibilidade e adubação fosfatada. Porto Alegre: **Ed. Autores**, 2020.

RIBEIRO, MR.; RIBEIRO FILHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T. Origem e classificação dos solos afetados por sais. Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados. 2. ed. Fortaleza: INCTSal, 2016, p. 12-19.

RICHARDS, L. **Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils**; U.S. Department Agriculture Handbook 60; U.S. Government Printing Office: Washington, DC, USA, 1954.

RODRIGUES, Marcos et al. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science of the Total Environment**, v. 542, p. 1050-1061, 2016.

RUAS, DGG., GARCIA, JC., TEIXEIRA, NM. Origem e importância do sorgo para o Brasil. RECOMENDAÇÕES PARA O CULTIVO DO SORGO. Circular Técnica, EMBRAPA/CNPMS, n. 1, p. 7-13, 1982.

SAHIN, Ustun et al. Use of a stabilized sewage sludge in combination with gypsum to improve saline-sodic soil properties leached by recycled wastewater under freeze-thaw conditions. **Journal of Environmental Management**, v. 274, p. 111171, 2020.

SANTOS HG. SIBCS, disponibilizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária–EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, v. 5, 2018.

SANTOS, H. G. [et al.]. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SCHLEGEL, ALAN J. et al. Corn response to long-term applications of cattle manure, swine effluent, and inorganic nitrogen fertilizer. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 5, p. 1701-1710, 2015.

SILVA, Cleybson José Cruz et al. Uso do gesso agrícola na disponibilidade de nutrientes e desenvolvimento de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Revista Geama**, v. 7, n. 1, p. 44-51, 2021.

SILVA, Y. G. et al. Desenvolvimento do Sorgo cultivado com água salina e adubação orgânica. **Cadernos Macambira**, [S. l.], v. 8, n. especial3, p. 52–68, 2023.

SILVA, Mayara Mariana Alves et al. Soil conditioners as candidates to mitigate salt/water stress effects on sorghum growth and soil properties. *Australian Journal of Crop Science*, v. 15, n. 1, p. 98-106, 2021.

SOUSSI, ASMA et al. Plant-associated microbiomes in arid lands: diversity, ecology and biotechnological potential. **Plant and Soil**, v. 405, p. 357-370, 2016.

SRIVASTAVA, Pankaj Kumar et al. Effects of combined application of vermicompost and mineral fertilizer on the growth of *Allium cepa* L. and soil fertility. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 175, n. 1, p. 101-107, 2012.

STAVI, I.; THEVS, N.; PRIORI, S. Soil Salinity and Sodicity in Drylands: A Review of Causes, Effects, Monitoring, and Restoration Measures. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, 11 ago. 2021.

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

USS Working Group WRB, 2015. **Base referencial mundial del recurso suelo 2014, actualización 2015**. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.

XIONG, JUAN et al. Role of clay minerals in controlling phosphorus availability in a subtropical Alfisol. **Geoderma**, v. 409, p. 115592, 2022.

YUSRIANI, Y. et al. Potential and utilization of sorghum in dry land as animal feed. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2024. p. 012023.

4. ARTIGO 1

FORMAS E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLOS AFETADOS POR SAIS DO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO

RESUMO

O manejo da fertilidade dos solos no semiárido pernambucano, especialmente os afetados por sais, requer uma análise detalhada das frações disponíveis de fósforo (P). Este estudo visa avaliar a disponibilidade de fósforo em solos salinizados através do fracionamento das formas do elemento no solo e da relação dessas formas com os teores obtidos por diversos extratores, além da absorção por uma cultura tolerante à salinidade. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em blocos casualizados (DBC), dispostos em esquema fatorial com cinco doses de fósforo (0, 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅), aplicadas em quatro Cambissolos coletados em diferentes áreas de Serra Talhada, no Semiárido de Pernambuco. A cultura escolhida foi o sorgo sudão, reconhecido por sua tolerância à salinidade. Amostras de solo foram coletadas até a profundidade de 0-20 cm para caracterização química e física. A colheita do sorgo ocorreu ao final do período vegetativo, aos 50 dias, e amostras homogêneas de solo foram coletadas dos vasos para determinar o fósforo disponível e para o fracionamento químico do fósforo inorgânico, conforme o método de Shaheen et al. (2007). O P disponível dos solos foi determinado usando os extratores Mehlich-1, Olsen, Chang & Jackson, Saunder, Soltanpour e Pox. Os resultados do fracionamento mostraram a ausência da fração lábil em todos os solos avaliados. No solo 1, a fração predominante foi o P-Cálcio-estável (54%), além da predominância do P residual. Nos solos 2 e 3, a fração predominante foi o P residual, com 82% e 59%, respectivamente. No solo 4, destacou-se a fração P-Ferro não lábil, com cerca de 53%. A análise de componentes principais indicou que a fração P-óxidos de Fe e Al se correlacionou com o solo 2, apresentando teores em torno de 6,5%. No fracionamento, os solos apresentaram maiores teores de P no compartimento não-lábil, seguido pelas frações pouco lábeis e lábeis. Nenhum dos extratores testados mostrou correlação com o P recuperado pela planta ou com as formas de P obtidas no fracionamento.

Palavras-chave: Fósforo disponível, Solos salinizados, Extratores de fósforo, Sorgo sudão.

ABSTRACT

FORMS AND AVAILABILITY OF PHOSPHORUS IN SALT-AFFECTED SOILS OF THE SEMIARID REGION OF PERNAMBUCO

The management of soil fertility in the semi-arid region of Pernambuco, particularly in soils affected by salts, requires a detailed analysis of the available phosphorus (P) fractions. This study aims to assess the availability of phosphorus in salinised soils through the fractionation of the element's forms in the soil and the relationship of these forms with the levels obtained by various extractors, in addition to the uptake by a salt-tolerant crop. The experiment was conducted in a greenhouse, in a randomised block design (RBD), arranged in a factorial scheme with five phosphorus doses (0, 30, 60, 90, and 120 kg ha⁻¹ of P₂O₅), applied to four Cambisols collected from different areas of Serra Talhada, in the semi-arid region of Pernambuco. The chosen crop was Sudan grass, known for its salinity tolerance. Soil samples were collected down to a depth of 0-20 cm for chemical and physical characterisation. The Sudan grass was harvested at the end of the vegetative period, at 50 days, and homogeneous soil samples were collected from the pots to determine the available phosphorus and for the chemical fractionation of inorganic phosphorus, according to the method of Shaheen et al. (2007). The available P in the soils was determined using the Mehlich-1, Olsen, Chang & Jackson, Saunder, Soltanpour, and Pox extractors. The fractionation results showed the absence of the labile fraction in all the soils evaluated. In soil 1, the predominant fraction was stable calcium-bound P (54%), in addition to the predominance of residual P. In soils 2 and 3, the predominant fraction was residual P, with 82% and 59%, respectively. In soil 4, the non-labile iron-bound P fraction stood out, with around 53%. Principal component analysis indicated that the Fe and Al oxide P fraction correlated with soil 2, with levels around 6.5%. In the fractionation, the soils presented higher levels of P in the non-labile compartment, followed by the slightly labile and labile fractions. None of the tested extractors showed correlation with the P recovered by the plant or with the P forms obtained in the fractionation.

Keywords: Available phosphorus, Salinised soils, Phosphorus extractors, Sudan grass.

4.1. INTRODUÇÃO

Entre as limitações edáficas, a degradação do solo por salinização é a principal razão para a perda de produtividade agrícola e demais implicações ambientais em muitas regiões áridas e semiáridas do mundo, como o Semiárido Brasileiro e parte do Agreste de Pernambuco. A salinização é um importante processo de formação do solo (primário, secundário ou antrópico), caracterizado por um excesso de sais solúveis em água, principalmente cloretos, sulfatos e bicarbonatos de sódio (Na), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), e/ou sódio trocável (Ribeiro et.al. 2016). Com a salinização, além do estresse osmótico causado pelo excesso de sais, os teores elevados de sódio, ou elevadas saturações por Na, provocam toxicidade às plantas e dispersão do solo, reduzindo a capacidade produtiva dos solos (Ribeiro et al., 2024; Nóbrega et al., 2024; Liu et al., 2022; Castro et al., 2021; Feitosa et al., 2018; Pedrotti et al., 2015).

O excesso de sais no solo também diminui a concentração de fósforo (P) no tecido das plantas, devido aos efeitos da força iônica e à diminuição da solubilidade deste mineral com o aumento dos níveis de NaCl no solo (Garcia et al., 2021). A disponibilidade de P para as plantas está relacionada à quantidade distribuída entre a solução do solo e a fase sólida, conhecida como fração lábil, cujas quantidades se correlacionam com o conteúdo de P absorvido e acumulado pelas plantas (Calheiros et al., 2022).

Em áreas do semiárido brasileiro, os solos com levada concentração de sais, especialmente os Cambissolos e Luvisolos, são reconhecidos por abrigar um estoque significativo de fósforo (Gama e Jesus, 2020). No entanto, o teor total de fósforo no solo não reflete sua disponibilidade para as plantas (Rocha et al., 2005). Para estudar a disponibilidade, são empregados métodos que utilizam diferentes soluções extratoras, os quais variam em sua intensidade de extração e reagentes empregados, utilizando, por exemplo, extratores de menor à maior intensidade. Extratores são comumente utilizados pela rapidez, baixo custo e por possibilitar agilidade às rotinas laboratoriais, e que os teores extraídos se correlacionem com o desempenho das plantas (Mumbach et al., 2018; Souza Júnior et al., 2012).

O método para estimar do P-disponível mais utilizado no Estado de Pernambuco e muito utilizado no Brasil e no mundo, é o extrator Mehlich-1 conhecido como duplo ácido ou Carolina do Norte (Mumbach et al., 2018). Por se tratar de um extrator fortemente ácido comumente solubiliza P por meio de dissolução ácida, disponibilizando em ordem decrescente formas não disponíveis de P-Ca, P-Fe e P-Al, superestimando os teores disponíveis do íon fosfato nos solos (Carneiro et al., 2023).

Muitos estudos na literatura concentram-se na aplicação exclusiva de um único extrator de fósforo no solo, que pode resultar em uma avaliação limitada da disponibilidade desse nutriente. Contudo existem uma variedade de outros extratores de P descritos na literatura (Shaheen et al., 2007; Rocha et al., 2005), cada um com suas próprias vantagens e limitações.

Venegas-González et al. (2014) descobriram que a técnica de Soltanpour, usando NH_4HCO_3 , não conseguiu extrair uma quantidade significativa de fósforo, mesmo com a adição de fosfato, o que sugere sua baixa eficácia em solubilizar formas de fósforo disponíveis para as plantas. Por outro lado, a solução extratora Mehlich⁻¹, apresentou uma alta extração de fósforo disponível devido à sua alta acidez. Esta solução extrai o fósforo de componentes minerais e orgânicos que não ficam imediatamente disponíveis para as plantas, mas quando fosfato é aplicado, a solução extrai menos de 50% deste, dependendo dos solos estudados.

Para compreender melhor as interações fósforo-solo e possibilitar um manejo adequado, é essencial entender a dinâmica desse elemento no solo. O fracionamento é uma técnica que permite identificar essas transformações, dependendo do manejo, das classes de solos e da adubação adotada, auxiliando no entendimento destas interações (Pinto et al., 2020; Oliveira et al., 2021; Harrell e Wang, 2006). Objetivou-se com este trabalho avaliar a disponibilidade de fósforo em solos afetados por sais, por meio do fracionamento das formas do elemento no solo e da relação dessas formas com os teores extraídos por extratores.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), localizada no município de Serra Talhada, PE, em condições de casa de vegetação. O clima da região segundo classificação de Köppen é do tipo BShw (clima seco de estepes de baixas latitudes; w = com chuvas de verão retardadas para o outono). A temperatura média anual é de 25,9 °C e a precipitação média anual é de 642 mm e concentrando-se principalmente entre os meses de dezembro a maio, correspondendo a 85% da média anual (Moura et al., 2006).

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, disposto em um esquema fatorial (4x5) os tratamentos consistiram de quatro tipo de solos e cinco doses de fósforo (0, 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅), com quatro repetições, totalizando 80 vasos e cultivados com Sorgo Sudão, cultivar IPA SF-25.

Foram utilizados dois CAMBISSOLOS Flúvicos eutróficos, denominados solo 1 e solo 2, coletados no campus da UFRPE em duas posições diferentes de relevo. O solo 1 foi coletado em terreno plano (7,9521° de latitude sul e 38,2949° de longitude oeste) e o solo 2 em posição de encosta (7,9543° de latitude sul e 38,2986° de longitude oeste). Ambos estavam cobertos por vegetação espontânea (*Prosopis juliflora*, *Mimosa* spp.) e sem uso agrícola há pelo menos cinco anos. Além desses, foram coletados dois CAMBISSOLOS Alcalinos, denominados solo 3 (7,9842° de latitude sul e 38,3210° de longitude oeste) e solo 4 (7,9838° de latitude sul e 38,3215° de longitude oeste), em duas condições diferentes de salinidade no perímetro irrigado Cachoeira II, às margens do Riacho Cachoeira e do Rio Pajeú. A coleta foi realizada na camada de 0-20 cm de profundidade (Tabela 1). Os 4 solos utilizados, foram ainda classificados como solos com atividade da fração argila alta (Ta), valores ≥ 27 cmol_c kg⁻¹ de argila.

Tabela 1. Características químicas e físicas das amostras dos CAMBISSOLOS Flúvicos eutróficos, solos 1 e 2, e dos CAMBISSOLOS Alcalinos, os solos 3 e 4.

Características	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 4
pH (água)	7,3	7,4	7,4	7,9
pH (CaCl ₂)	6,6	7,0	7,5	7,8
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	4,35	3,25	9,65	4,95
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,25	1,35	6,10	2,15
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,30	0,83	21,30	89,48
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,92	1,54	6,77	23,15
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,85	2,85	2	1,75
T (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾	11,68	9,81	45,82	121,48
P (mg dm ⁻³) ⁽²⁾	65,9	5,56	1,95	5,56
P-rem (mg dm ⁻³) ³	42,4	36,4	31,5	37,6
V% ⁽³⁾	75,59	70,96	95,63	98,55
PST ⁽⁴⁾	11,16	8,41	46,49	73,65
Areia (g kg ⁻¹)	835	723	314	587
Silte (g kg ⁻¹)	100	180	500	280
Argila (g kg ⁻¹)	80	100	180	120

1. Capacidade de troca de cátions potencial; 2. Fósforo remanescente; 3. Saturação por bases; 4. Percentagem de sódio trocável

Foram coletadas amostra para a caracterização química e física dos solos utilizados nos vasos (Tabela 1). Quimicamente foram realizadas as determinações de pH do solo em água e em CaCl, teores de Na, K, Ca e Mg trocáveis e acidez potencial (H+Al), além do P remanescente conforme métodos da Embrapa (2017).

Fisicamente foram realizadas as seguintes determinações: composição granulométrica, argila dispersa em água (ADA), densidade do solo e das partículas, conforme métodos descritos em Embrapa (2017).

O experimento foi conduzido em vasos plásticos, contendo 7 dm³ do solo. As sementes foram cedidas pelo Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) e semeadas 4 sementes por vaso, com desbaste realizado após 10 dias deixando apenas uma planta por vaso, dia zero. Durante os primeiros dias (10 dias após a semeadura), até a germinação e estabelecimento da cultura, a irrigação foi diária. A dose de água foi calculada pelo método de Penman-Monteith, parametrizado no boletim 56 da FAO, sendo ajustadas para área do vaso (Allen et al., 1998), utilizou-se água destilada. Após o estabelecimento da cultura a irrigação foi realizada com intervalo de um dia.

Antes do plantio foi feita a adubação fosfatada, sendo a fonte utilizada o fosfato monoamônio (MAP), aplicada na cova 5 dias antes do plantio, tempo necessário para a solubilização do adubo.

A necessidade de adubação com nitrogênio e potássio foi verificada em análise e seguiu o estabelecido pela Comissão Estadual de Fertilidade do Solo (2008). O nitrogênio presente no MAP foi compensado pela aplicação ureia, de modo que todos os tratamentos recebessem 91,7 kg ha⁻¹ de N.

A coleta do sorgo foi realizada no término da fase vegetativa, que ocorreu aos 50 dias após a semeadura, posteriormente, foi aferida a massa fresca da parte aérea do sorgo, em seguida o material foi levado para estufa com circulação de ar a 65-70 °C, até atingir peso constante, sendo, em seguida o material foi triturado em moinho de facas do tipo Wiley. O teor de P-total na matéria seca da parte aérea das plantas foi determinado após digestão nitroperclórica (Bataglia et al., 1983) e dosado no extrato por Colorimetria (Embrapa, 2009).

No momento do corte do sorgo foi coletado nos vasos amostras homogêneas de solo, ambas para as determinações de P. Na tentativa de encontrar o extrator mais indicado para os solos testados foram testados seis extratores com características distintas, conforme métodos descritos por Shaheen et al. (2007), descritos a seguir: Mehlich-1- ácido (0,05 M HCl+ 0,0125 M H₂SO₄; razão solo-solução de 1:10 e agitação de 5 minutos); Pox - ácido (0,175 M oxalato de amônio + 0,1 M ácido oxálico; razão solo-solução de 0,5:30 e agitação de 2 horas.); Soltanpour - neutro (1 M NH₄HCO₃+ 0,005 M DTPA; razão solo-solução de 1:2 e agitação de 15 minutos); Olsen - alcalino (0,5 M NaHCO₃; razão solo-solução de 1:20; agitação de 30

minutos); Chang & Jackson - alcalino (0,1 M NaOH + 1 M NaCl; razão solo-solução de 1:50 e agitação de 17 horas.); Saunder - alcalino (/0,1 M NaOH razão solo-solução de 1:50 e agitação de 17 horas). O teor de P no solo foi dosado no extrato por colorimetria de acordo com Embrapa (2009).

As amostras de solo coletadas nos vasos para determinação do P-disponível foram utilizadas também para análise do fracionamento do P. O fracionamento químico do fósforo foi realizado no controle, ou seja, no tratamento sem adição de MAP. A fracionamento foi realizada conforme método proposto por Olsen e Sommers (1982) (Tabela 2).

Tabela 2. Sequência e procedimento do fracionamento de P e formas de P alvo.

Fração	Extratores	Tempo	Lavagem	Diferentes formas de P
NaHCO ₃ -P	0.5 M NaHCO ₃	30min	nenhuma	P lábil incluindo P solúvel, considerado como disponível para o vegetal (Olsen et. al, 1954; Bowman e Cole, 1978)
NaOH-P	0.1 M NaOH+1 M NaCl	17h	1 M NaCl	P ligada principalmente à Óxidos de Fe e Al (Chang e Jackson, 1957; Delgado e Torrent, 2000; Harrell e Wang, 2006)
CB-P	0.3 M citrato de sódio +1 M NaHCO ₃	15 min a 85 °C	nenhuma	Fosfato re-adsorvido para superfícies de carbonatos durante a extração de NaOH anterior; também lábil, pedogenético, fosfatos de Ca (Williams et al, 1971; Delgado e Torrent, 2000; Harrell e Wang, 2006)
CBD-P	0,3 M citrato de sódio +1 M NaHCO ₃ +1 g de ditonito de sódio	aquecer por 15 min a 85 ° C após a adição CB; adicional 15 min após a adição de ditonito	saturado com NaCl	Redutor solúvel em P, principalmente presos dentro de Óxidos de ferro e óxidos hidratados (Chang e Jackson, 1957; Williams et. al, 1971)
HCl-P	1 N HCl	1 h	nenhuma	P-Ca estável incluindo apatita litogênica, excluindo P-Ca mais lábeis, formas removidas na CB anterior e fracções CBD (Chang e Jackson, 1957; Delgado e Torrent, 2000; Harrell e Wang, 2006)

Fonte: Shaheen et al. (2007)

O método foi modificado a partir da versão original com a adição de um passo inicial de extração com bicarbonato de sódio (extrator Olsen) para o P disponível para a planta (Harrell e Wang, 2006). A fração de P residual também não foi feita pelo mesmo método do

fracionamento, sendo feita a extração do P total conforme metodologia descrita por O'Halloran (1993) e o P residual foi calculado por diferença.

Os dados foram submetidos a teste de normalidade por meio do teste Shapiro-Wilk, quando estes critérios foram atendidos, as médias foram submetidas a regressão ao nível de 5% de significância, pelo software SISVAR, para avaliar os extratores estudados, as diferentes frações de P obtidas, com as características químicas e físicas do solo, e a relação dos extratores com a parte aérea foram avaliados por análise de componente principal (PC), utilizando o software estatístico Past®, versão 4.0.

4.3. RESULTADOS

Notou-se, através da análise granulométrica, que os Cambissolos 1, 2 e 4 são predominantemente compostos por areia, seguido de silte e argila, sendo o solo 1 o mais arenoso. Já o solo 3 apresenta predominância de silte e exibe os maiores teores de argila entre os solos analisados. Além disso, os solos 1 e 2 mostraram os maiores teores de fósforo remanescente (P-rem), conforme demonstrado na Tabela 1.

Na figura 1, foi realizada correlação entre as frações (mg kg^{-1}) de fósforo e atributos dos solos 1, 2, 3 e 4, a análise de componentes principais mostrou que os dois componentes principais permitiram explicar 76.11% da variância contida nas variáveis originais. O componente principal 1 (CP1), contribuiu com 46.06% e o componente principal 2 (CP2) com 30.05%. Nota-se que o comportamento das frações de fósforo muda de acordo com o tipo de solo e/as suas particularidades, os solos 1 e 2 agrupam-se próximos, indicando que eles possuem características similares, já os solos 3 e 4 formam grupos distintos, indicando que suas características são diferentes das dos solos 1 e 2.

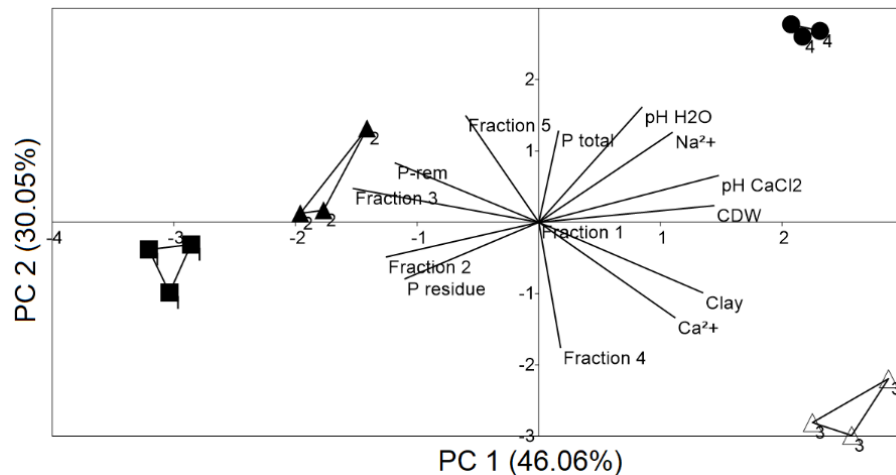
A fração 1, lábil, extraída por NaHCO_3 (P-solúvel) não foi detectada em nenhum dos solos avaliados (figura 1). O solo 1 teve maior relação com a fração de fósforo extraída por NaOH-P (fração 2) e do fósforo residual (figura 1).

A fração 5 (HCl-P, P-Ca não lábil), o fósforo remanescente (P-rem), e a fração 3 (CB-P) foram as formas de P distribuídas no solo 2. No solo 3, a fração que mais se relacionou com a argila e com o teor de Cálcio foi a fração 4, extraída por Citrato bicarbonato ditionato (CBD-P), por se tratar de um solo com um teor elevado de íons de cálcio, sódio e pelo teor de argila. Nos solos 3 e 4, observou-se, que os valores da Percentagem de sódio trocável (PST) acima de 15% (Tabela 1), indicam alto teor de sais de sódio nas amostras de solo coletadas.

Variáveis relacionadas ao teor de sódio, dispersão de argila, tiveram relação com o solo 4 (Figura 1), solo que apresentou maior teor de Na^{+2} (Tabela 1).

As frações de P foram também submetidas a testes de correlação linear de Pearson entre as frações de P e algumas características do solo e o P absorvido pela parte aérea da planta (Tabela 3).

Figura 1. Análise de componentes principais de variáveis relacionadas com as frações (mg kg^{-1}) de P e os atributos dos Cambissolos Flúvicos eutróficos, solos 1 e 2, e dos Cambissolos Alcalinos, os solos 3 e 4.



Fonte: autor, 2024.

Através dos resultados demonstrados na Tabela 3, vemos que o pH apresentou maior correlação com o P total, sendo esta negativa ($r = -0,65^{**}$) e também com o P residual ($r = -0,61^{**}$), o que indica que quanto maior o pH, menor o P total e P residual.

As maiores correlações do Ca foram negativas e com as frações de P-Fe lábil ($r = -0,61^{**}$) e P-Ca lábil ($r = -0,60^{**}$), indicando que quanto maior o teor de Ca nesses solos, menor será o teor dessas frações. Já o P remanescente teve suas maiores correlações positivas e sendo com as frações de P-Ca não lábil ($r = 0,80^{**}$) e com P total ($r = 0,81^{**}$).

Todas as correlações significativas do Na foram negativas, e essas ocorreram com as frações; P-Fe lábil, P-Ca lábil, P-Ca não lábil, P total, P residual e P absorvido pela planta; sendo que a maior ocorreu com o P residual ($r = -0,72^{**}$), indicando que quanto mais sódico for o solo, menor será o teor de P no solo, principalmente nas frações mais estáveis do solo (P residual), e maior será a dificuldade de absorção desse P pela planta (Tabela 3).

Na figura 2 é apresentado a relação dos tipos extratores e as frações obtidas nos quatro tipos de solos, a análise de componentes principais mostrou que os dois componentes principais permitiram explicar 78.33% da variância contida nas variáveis originais (Figura 2).

O componente principal 1 (CP1), contribuiu com 62.99% e o componente principal 2 (CP2) com 15.35%.

No solo 1, os extratores ácidos (Mehlich-¹ e Pox), se relacionaram com as frações mais estáveis, ou seja, a fração 5 e com P total. No solo 2 teve uma maior participação dos extratores neutros e alcalinos, Soltampour, Olsen, Chang e Jackson e Saunder, e associaram-se com as frações 2 e fração 3 e os extratores mais neutros. No solo 4, a fração 4 foi a mais representativa do P nesse solo (figura 2).

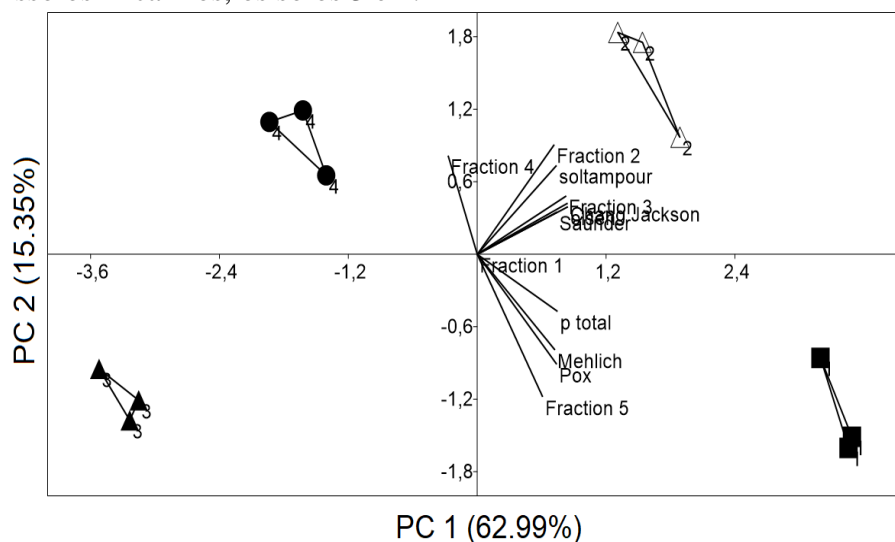
Tabela 3. Coeficientes de correlação de Pearson entre os teores das frações de P inorgânico e características dos solos.

Características do solo	pH	Ca	P-rem	Na	Argila
Frações					
NaHCO ₃ -P	-0.0127 ^{ns}	-0.1474 ^{ns}	-0.0633 ^{ns}	-0.1030 ^{ns}	-0.0518 ^{ns}
NaOH-P	-0.2653*	-0.6167**	0.2015 ^{ns}	-0.5104**	-0.4783**
CB-P	-0.3639**	-0.6000**	0.5555**	-0.4966**	-0.6595**
CBD-P	0.0912 ^{ns}	0.0380 ^{ns}	-0.1876 ^{ns}	0.0561 ^{ns}	0.1270 ^{ns}
HCl-P	-0.5625**	-0.3144*	0.8083**	-0.4929**	-0.6527**
P-total	-0.6563**	-0.4982**	0.8183**	-0.6763**	-0.7720**
P-Residual	-0.6147**	-0.5670**	0.6168**	-0.7276**	-0.7036**
Planta	-0.5119**	-0.2512*	0.2129 ^{ns}	-0.5951**	-0.3115*

** Significativo a 1% de probabilidade. * Significativo a 5% de probabilidade. ^{ns} Não significativo.

Fonte: autor, 2024.

Figura 2. Análise de componentes principais de variáveis relacionadas com os extratores (mg kg⁻¹) de P disponível e as frações de fósforo nos Cambissolos Flúvicos eutróficos, solos 1 e 2, e dos Cambissolos Alcalinos, os solos 3 e 4.



Fonte: autor, 2024.

Os dados apresentados na Tabela 4 revelam uma ampla variação nos teores de fósforo (P) encontrados nos solos estudados. Os Cambissolos Flúvicos eutróficos (solos 1 e 2) apresentaram os maiores teores de P total, enquanto os Cambissolos Alcalinos (solos 3 e 4)

exibiram os menores valores. O teor mais elevado foi de 247,7 g/dm³, registrado no solo 1, e o menor foi de 14,5 g/dm³, encontrado no solo 4. A média do teor de P total em todos os solos analisados foi de 99,27 g/dm³ (Tabela 4).

No solo 1, a fração predominante é HCl-P (Fração 5 P-Ca não lábil), representando 54% do P total (Tabela 4), corroborando o comportamento observado na Figura 2. Nos solos 2 e 3, as frações de P residual apresentaram as maiores porcentagens, sendo de 82% e 59%, respectivamente. Observa-se ainda nesses solos que a segunda fração predominante é a fração extraída por CBD (P- Fe/Al na forma não lábil). No solo 2 (Cambissolos Flúvicos eutróficos), também é possível notar a participação da fração extraída por NaOH-P (Fração 2 P-Fe lábil).

No solo 4, a fração extraída por CBD (P-Fe não lábil) foi predominante, representando 52% do P total. A fração de P residual aparece em seguida, contribuindo com 31% do P total.

Tabela 4. Teores das diferentes frações e do P total em g/dm³e porcentagem de cada fração de P nos solos em relação ao fósforo total (%).

Solos				
Frações	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 4
NaHCO ₃ -P	0,0(0)	0,03(0)	0,0(0)	0
NaOH-P	2,15(0,8)	7,03(6,5)	0,0(0)	0,31(2,1)
CB-P	2,5(1,0)	2,2(2,0)	0,57(2,05)	0,9(6,2)
CBD-P	6,7(2,7)	8,04(7,5)	7,7(27,7)	7,6(52,3)
HCl-P	134,5(54)	1,8(1,7)	4,8(17,2)	1,2(8,2)
P-Res	101,7(41)	88,1(82)	16,4(59)	4,5(31)
P total	247,7	107,2	27,7	14,5

Fonte: autor, 2024. P-Res: Fósforo residual.

Na tabela 5 é apresentado os coeficientes de correlação linear simples entre os teores das frações de P inorgânico do solo e os teores de P extraídos do solo pelos extratores e pela planta nos Cambissolos Flúvicos eutróficos 1 e 2. O solo 1 (Tabela 5), apresentou maior correlação do Mehlich⁻¹ com a fração 4 (P-Fe não lábil) ($r=0,68^*$). Olsen e Pox apresentaram a maior correlação sendo negativa com a fração 2 (P-Fe lábil), sendo essas de $r=-0,67^{**}$ e $r=-0,82^{**}$, respectivamente. A planta apresentou alta correlação com a fração 3 (P-Ca lábil) ($r=0,90^{**}$), mas não apresentou nenhuma correlação com os extratores testados. Estudos com outros extratores, que extraíam preferencialmente esta fração do solo devem ser testados.

Para o solo 2, o extrator Olsen apresentou correlação negativa com as frações mais estáveis do solo, P residual ($r=-0,68^*$), e o P total ($r=-0,62^*$). O extrator Saunder também apresentou correlação negativa, porém com a fração P-Fe não lábil ($r=-0,61^*$). Os extratores

Pox, Chang Jackson o e Soltampour não apresentaram correlação significativa com as frações de P (Tabela 5). O P recuperado pela planta não apresentou correlação significativa para frações e para os extratores, o que reforça mais uma vez a necessidade de outros estudos para definir o melhor extrator para esse tipo de solo.

Os coeficientes de determinação dos extratores e da parte aérea (PA) não obtiveram resposta significativa (Tabela 6), os únicos extratores que foram significativos nos Cambissolos Flúvicos eutróficos, denominados solo 1 e solo 2, foram Olsen e Soltampour, não foi obtido modelos significativos para parte aérea. As soluções extratoras foram capazes de extrair teores de fósforo relacionados com algumas frações, porém esses não demonstraram correlação direta com a absorção pela planta.

Tabela 5. Coeficientes de correlação linear simples entre os teores das frações de P inorgânico do solo e os teores de P extraídos do solo por vários extratores e pela planta no Cambissolos Flúvicos eutróficos 1 e 2.

Extratores	Mehlich ⁻¹	Olsen	Chang Jackson	Pox	Saunders	Soltampour	Planta
Frações				Solo 1			
NaHCO ₃ -P	0,0 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,0 ^{ns}
NaOH-P	0,3888 ^{ns}	-0,6733*	-0,3265 ^{ns}	-0,8240**	0,4262 ^{ns}	0,3368 ^{ns}	0,0977 ^{ns}
CB-P	0,3471 ^{ns}	0,3102 ^{ns}	0,1038 ^{ns}	-0,0111 ^{ns}	-0,3844 ^{ns}	0,2359 ^{ns}	0,9050**
CBD-P	0,6863*	-0,3489 ^{ns}	-0,2739 ^{ns}	-0,1937 ^{ns}	-0,0094 ^{ns}	0,2136 ^{ns}	0,0322 ^{ns}
HCl-P	0,5655 ^{ns}	0,1339 ^{ns}	0,3379 ^{ns}	0,0665 ^{ns}	0,2311 ^{ns}	0,3825 ^{ns}	0,3362 ^{ns}
P-total	-0,5207 ^{ns}	-0,2119 ^{ns}	0,4043 ^{ns}	-0,2791 ^{ns}	0,3821 ^{ns}	0,4137 ^{ns}	0,0577 ^{ns}
P- Res	0,1180 ^{ns}	-0,4579 ^{ns}	0,2940 ^{ns}	-0,4812 ^{ns}	0,3507 ^{ns}	0,1931 ^{ns}	-0,3337 ^{ns}
Planta	0,0184 ^{ns}	0,1923 ^{ns}	-0,1727 ^{ns}	-0,0182 ^{ns}	-0,4807 ^{ns}	-0,1053 ^{ns}	
Frações				Solo 2			
NaHCO ₃ -P	0,0825 ^{ns}	0,1709 ^{ns}	0,3361 ^{ns}	-0,3784 ^{ns}	-0,1406 ^{ns}	-0,0521 ^{ns}	-0,5717 ^{ns}
NaOH-P	-0,1464 ^{ns}	0,5658 ^o	0,3147 ^{ns}	-0,3443 ^{ns}	0,3506 ^{ns}	0,3845 ^{ns}	0,2201 ^{ns}
CB-P	-0,1659 ^{ns}	0,0060 ^{ns}	-0,2084 ^{ns}	0,3155 ^{ns}	-0,0519 ^{ns}	0,5678 ^{ns}	0,2249 ^{ns}
CBD-P	-0,2919 ^{ns}	-0,3990 ^{ns}	0,2228 ^{ns}	-0,3647 ^{ns}	-0,6169*	0,1649 ^{ns}	-0,1763 ^{ns}
HCl-P	0,2360 ^{ns}	0,3475 ^{ns}	-0,3025 ^{ns}	-0,3492 ^{ns}	0,1989 ^{ns}	0,3406 ^{ns}	-0,4389 ^{ns}
P-total	-0,4444 ^{ns}	-0,6284*	-0,0141 ^{ns}	0,4222 ^{ns}	-0,1806 ^{ns}	-0,5563 ^o	-0,3053 ^{ns}
P- Res	-0,3544 ^{ns}	-0,6808*	-0,0574 ^{ns}	0,4524 ^{ns}	-0,1594 ^{ns}	-0,5939 ^{ns}	-0,2818 ^{ns}
Planta	-0,3396 ^{ns}	-0,1683 ^{ns}	0,0553 ^{ns}	0,2191 ^{ns}	0,0269 ^{ns}	-0,1059 ^{ns}	

** Significativo a 1% de probabilidade. * Significativo a 5% de probabilidade. Sem asteriscos = Não significativo. Fonte: autor, 2024.

Tabela 6. Modelos de Equação de regressão linear simples obtidos a partir das aplicações de doses de P e aos extratores e sua relação com P acumulado na parte aérea (PA), nos Cambissolos Flúvicos eutróficos 1 e 2, com seus respectivos coeficientes de determinação.

Extratores	Solos	Equação	R ²
Mehlich⁻¹	1	$Y = 1,783e +00+ 6,667e-07$	$R^2 = 1,22e-05^{ns}$
	2	$Y = 00,7825+0,00067$	$R^2 = 0,8963^{ns}$
Olsen	1	$Y = 1,9567 + 0,0021 * X$	$R^2 = 0,8898^*$
	2	$Y = 1,6969 + 0,0048 * X$	$R^2 = 0,8717^*$
Soltampour	1	$Y=1,0207+0,0019 * X$	$R^2=0,8611^*$
	2	$Y=0,8118+0,0014 * X$	$R^2=0,8963^*$
PA	1	$Y=0,6658+0,002$	$R^2=0,1461^{ns}$
	2	$Y=0,6172+0,00017$	$R^2=0,134^{ns}$

*:Significativo a 5% de probabilidade. ns: Não significativo. Fonte: autor, 2024.

4.4. DISCUSSÃO

Devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas, os Cambissolos variam muito de um local para outro. Assim, a classe comporta desde solos fortemente até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos, de cor bruna ou bruno-amarelada até vermelho-escura, de alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração argila (SIBCS, 2018).

A dinâmica do fósforo no solo depende dos mecanismos de dissolução e precipitação, sorção e desorção, cada forma de P do solo possuem particularidades em relação a esses mecanismos, segundo sua natureza química e energia de ligação, e pela variação na composição mineralógica dos solos. (Gupta et al., 2022; Rawat et al., 2021; Doydora et al., 2020; Rheinheimer et al., 2020; Penn e Camberato 2019; Zhu et al., 2018, Souza Júnior et al., 2012).

Neste estudo, os solos apresentaram um pH (CaCl₂) variando de 7,3 a 7,9 (Tabela 1). Ao avaliar a correlação entre as frações de fósforo e as características dos solos, observou-se uma correlação negativa entre o pH do solo e as frações estáveis de fósforo, como o P total e o P residual (Tabela 3).

Isto indica que, quanto maior o pH, menores são as frações de P total e P residual. Rosa et al. (2016) observaram que a maior disponibilidade de P na solução do solo ocorre na faixa de pH em que os compostos fosfatados apresentam máxima solubilidade, à medida que o pH CaCl₂ se elevou acima de 6,5, os teores de P disponível começaram a diminuir, provavelmente devido ao alto nível de Ca, que tende a se ligar com o P, tornando-o indisponível. De acordo com Doydora et al. (2020), o pH ácido (pH < 7) favorece a

associação do P com Al e Fe, enquanto o pH alcalino ($\text{pH} > 7$) favorece a associação com o Ca.

Os solos analisados neste estudo também demonstraram uma elevada proporção de argila (Tabela 1). Todas as correlações significativas envolvendo a argila foram negativas (Tabela 3). Devido à influência da textura do solo, é esperado que a fração argilosa apresente uma maior capacidade de adsorção de fosfatos, dada a sua maior superfície específica, conforme discutido por Helfenstein et al. (2020) e Pereira et al. (2020).

A concentração de sódio (Na) presente nos solos e sua correlação negativa com as frações de fósforo (P) (Tabela 3) indicam que, em solos com alto teor de sódio, o teor de fósforo tende a ser reduzido. Além disso, a absorção de fósforo pelas plantas torna-se mais difícil, uma vez que o excesso de íons de sódio (Na^+) pode precipitar com os íons de fósforo no solo, resultando na adsorção de fósforo. Xie et al. (2022) observaram uma correlação negativa significativa entre o teor de sal do solo e o fósforo disponível, evidenciando que o fósforo disponível diminui à medida que a salinidade do solo aumenta, o mecanismo de redução da biodisponibilidade do fósforo sob barreira alcalina salina pode ser devido principalmente a duas razões: toxicidade de íons da cultura e deficiência de nutrientes causada pelo sal.

O teor de cálcio apresentou uma correlação negativa com a fração 2 (NaOH-P P-Fe lábil) e a fração 3 (CB-P P-Ca lábil), ambas frações lábeis (Tabela 3). Isso indica que um aumento na presença de cálcio resulta em menor disponibilidade dessas frações. Ding et al. (2020) relataram um comportamento semelhante em solos alcalinos, onde a fração de fósforo ligada ao cálcio (Ca-P) foi a mais abundante.

O fato da fração NaHCO_3 não ter extraído, ou ser extraída em BAIXO TEORES de P (Tabela 4) possivelmente ocorreu por ser a fração absorvida imediatamente pela planta, o que resulta em baixas concentrações ou ausência do P solúvel no solo, conforme apresentado na Tabela 5. Esse comportamento foi observado por Shaheen et al. (2007), ao quantificar a relação entre as formas inorgânicas de P e as propriedades do solo para alguns Entissolos e Aridissolos do Egito. Wang et al. (2023) observou que ao testar fontes de P o superfosfato foi prontamente dissolvido na solução do solo e imediatamente transformado com frações de P lábeis do solo.

O solo 1 apresentou maior relação com a fração 2 e o fósforo residual (Figura 1). O fracionamento sequencial inicial de P do solo realizado por Araújo et al. (2004) mostrou que o

P estava distribuído principalmente nas frações: residual (P-residual) e hidróxido de sódio (NaOH) compreende P ligado aos óxidos de Fe e Al, moderadamente lábil, segundo os autores, essa relação tem sido encontrada na maioria dos solos, que apresentando como principais frações acumuladoras de P no solo a fração residual e a fração hidróxido, quer tenham sido fertilizados ou não.

Devido sua menor labilidade a fração 2 extraída por hidróxido de sódio (NaOH-P) funciona como um dreno de P para a solução do solo, tendo maior significância para o solo 2 (Tabela 4), uma vez que as formas mais lábeis são consumidas por plantas e micro-organismos, uma parte da fração de fósforo inorgânico moderadamente lábil oculta é convertida na fração extraída por bicarbonato de sódio (NaOHCO₃), continuando a tamponar o sistema de disponibilidade de fósforo para plantas (Alves de Oliveira et al., 2021; Assunção et al., 2020).

Das frações analisadas, o teor de P disponível para as plantas pode ser considerado como a soma das frações extraída por NaHCO₃-P (fração 1-Prontamente disponível), NaOH-P (fração 2- P-fe lábil), e CB-P (fração 3-P-Ca lábil) (Rheinheime Anghinoni; Kaminski, 2000). Esses compartimentos de P possuem tempo médio de residência (turnover).

A fração 5, extraída por ácido clorídrico, está associada à presença de carbonato de cálcio livre, evidenciando a predominância do cátion Ca no solo em condições alcalinas, conforme observado neste estudo (figura 1), e correspondeu a 54% do fósforo total no solo 1 (Tabela 5). Meyer et al. (2020) observou em Cambissolos em condições de pH mais elevados no solo calcário, a disponibilidade de P foi consistentemente baixa, presumivelmente devido à precipitação de minerais P-Ca pouco solúveis.

Iaaich et al. (2021) observaram que, em solos do Marrocos, as frações de eficiência de utilização de fósforo (P) ou frações lábeis foram frequentemente muito baixas. Isso ocorre principalmente devido à predominância de solos alcalinos, os quais intensificam as reações de sorção de P com Ca²⁺, resultando na formação de compostos de fósforo menos solúveis ou insolúveis. Hill (2004) enfatiza que, devido ao elevado valor de pH dos solos salinos, mais de 75% do fertilizante fosfatado se combina com cálcio no solo, formando uma série de fosfatos de baixa solubilidade. Esse processo reduz significativamente a disponibilidade de fósforo e a eficiência de utilização do fertilizante fosfatado.

O P-rem pode ser um estimar do nível crítico de fósforo no solo, que diferencia entre alta e baixa probabilidade de resposta à adubação fosfatada (Pereira; Farias, 1998) neste

estudo, constatou-se uma faixa de variação de P-rem de 42,4 a 31,5 mg L⁻¹ (Tabela 1), e observou-se relação com a fração 3 (CB-P), e a fração 5 (HCl-P), para o solo 2 (Figura 1). Um estudo conduzido por Corrêa, Nascimento e Rocha (2011), avaliaram 10 solos do estado de Pernambuco, obtiveram valores de P-rem que oscilaram entre 12,8 e 57,8 mg L⁻¹. Os autores atribuíram essa variação à diversidade das características dos solos.

A presença da fração 4 (CBD-P) no solo 3 é explicada pela alta concentração de íons de cálcio e pela presença de argila (Figura 1) e confirmado pelos teores significativos dessa fração no solo 3 e 4 em relação ao P total (Tabela 4). Em solos alcalinos, como no presente estudo, a escassez de fósforo (P) geralmente resulta de sua precipitação com cálcio e outros cations presentes no solo. Vieira et al. (2021) observaram que a sorção de fósforo foi mais acentuada em solos com textura argilosa, alcalina e elevada concentração de cálcio. Os solos 3 e 4 apresentam alta concentração de sódio, conforme mostrado na Tabela 1.

Ao analisar a relação dos extratores de P disponível e as frações de fósforo (Figura 2), observou-se para o solo 1 maior relação dos extratores mehlich⁻¹, Pox e as frações 5 (HCl-P) e P total. Extratores ácidos, como o Mehlich-1, são muito utilizados por possibilitar análises de baixo custo e mais viáveis para uso rotineiro em laboratórios. Mehlich⁻¹ tem seu uso restrito em solos argilosos, esse fator pode explicar o destaque dele no solo 1 (figura 2), um solo que em comparação aos solos do experimento possui um menor teor de argila.

A Fração 5 (HCL-P) fósforo extraído por ácido clorídrico extrai P ligado aos minerais calcícticos, não acessadas por outro extrator, por isso sua relação com o extrator Mehlich⁻¹ (Figura 2), esse comportamento da associação da fração de fósforo ligada ao cálcio pelo extrator mehlich-1, também foi observada por Pessoa Junior et al. (2021) observou entre todas as frações a forma P-Ca foi a que apresentou semelhanças para o extrator mehlich⁻¹, e pode evidenciar uma possível superestimação do fósforo disponível pela solubilização da fração ligada a cálcio. Nesta situação, o extrator tende a recuperar a fração de P não acessível pela planta (P-Ca), superestimando os teores disponíveis deste elemento.

Os extratores neutros e alcalinos tenderam a se relacionar com o solo 2, e as frações 2 e 3 (Figura 2), vários estudos enfatizam o extrator Olsen como uma alternativa para solos alcalinos, devido ao seu potencial para a correta determinação do teor de P disponível em solos sob diferentes manejos no Semiárido (Carneiro et al., 2023; Oliveira et al., 2021; Raij, 1978) (figura 2). Raiesi e Hosseinpur (2017), ao comparar extratores químicos em 10 solos calcários no Irã obtiveram um desempenho melhor de Olsen em comparação com Mehlich⁻¹.

Braun et al. (2019) avaliando a capacidade de solo para estimar o fósforo lábil em camada superficial do solo (0–20 cm) coletada de seis locais diferentes dentro dos experimentos suecos de fertilidade do solo de longo prazo, observaram melhor desempenho do extrator Olsen em solos calcários e não calcários do que o extrator ácido, os autores acrescentam que o extrator apresentou um desempenho uniforme e extraiu menos P não lábil do que o extrator ácido.

Estudos com extratores neutros, em solos da região Nordeste, se torna interessante principalmente por se tratar de ambientes menos intemperizados que, normalmente, possuem pH mais elevado, alto teor de P ligado a Ca, podendo superestimar os teores de P disponível, e acarretar em recomendações de adubações fosfatadas incorretas (Calheiros et al., 2022).

Foi observado uma correlação significativa para os extratores Olsen e Soltampour (Tabela 6), Venegas-González et al. (2014) observaram um coeficiente significativo para o extrator Olsen ao estudar a correlação e calibração de quatro técnicas de extração de fósforo disponível (Soltanpour e Schwab, mehlich 1, Olsen e Bray P1) em solos com características semelhantes às deste estudo, sendo estes solos alcalinos e ricos em argila. Eles concluíram que as melhores técnicas de extração para determinação do fósforo disponível foram Olsen e Bray P1 (ácido clorídrico e Fluoreto de amônio), assemelhando-se a similaridade dos valores de Soltampour e Olsen, visto que o Olsen é o tradicional para solos iguais ao deste estudo, uma vez que o método foi desenvolvido para ser usado em solos alcalinos (Olsen et al., 1954) (figura 4).

Na tabela 5 é possível observar que neste estudo as soluções extratoras foram capazes de extrair teores de fósforo relacionados com algumas frações, porém esses não demonstraram correlação direta com a absorção pela planta. De acordo com Gu e Margenot (2021), o fósforo pode existir nos solos como uma mistura de adsorvido e precipitado como formas discretas nas superfícies minerais, com suas proporções relativas dependendo da proporção entre a concentração de P solúvel e o mineral, ou que não seja capaz de ser extraída por alguns extratores, mesmo aqueles específicos para as condições do solo.

Considerando o que foi estudado muitas técnicas analíticas para caracterização de P no solo apresentam vantagens, desvantagens, os extratores químicos devem ser utilizados para determinar quanto de P extraído do solo pode ser disponível às plantas, refletindo teoricamente a quantidade de P que as plantas podem absorver do solo. Entretanto, em nosso estudo, não foi estabelecida uma correlação significativa entre os valores de P extraídos pelo extrator químico e a disponibilidade real de P para as plantas (Tabela 5). De acordo com Sims

et al. (2023) os testes convencionais de determinação de fósforo do solo podem não refletir adequadamente a quantidade de fósforo residual disponível para as plantas. Isso ocorre porque grande parte do fósforo residual está em formas que não são detectadas pelos métodos tradicionais de teste de solo.

Estratégias que as plantas lançam para absorver fósforo, como respostas adaptativas as plantas tendem a aumentar comprimento de raízes e aumentar o número e comprimento dos pelos radiculares, além disso algumas espécies desenvolveram uma adaptação especializada da arquitetura radicular denominada raízes proteóides, que consiste em aglomerados de raízes laterais que secretam ácidos orgânicos e prótons em um pequeno volume do solo, criando assim as condições para a liberação eficiente do fósforo e outros nutrientes do complexos insolúveis (Paz-Ares et al., 2022).

As estruturas radiculares como as micorrizas são estratégias tipicamente expressa em plantas em solos severamente empobrecidos em P ou fortemente sorventes de P. Elas exibem uma estratégia de solubilização de P (Lambers, 2021). Estudos de Wang et al. (2023) demonstraram que a atividade da raiz governa a solubilidade, disponibilidade e pools de fósforo, influenciando a atividade microbiana do solo por meio da exsudação da raiz. Finalmente, a atividade da raiz (por exemplo, exsudação de ácido orgânico) pode quelatar o Ca presente nas ligações cálcio-fosfato (por exemplo, por meio de grupos hidroxila e carboxila) ou competir com o fosfato por locais de adsorção, aumentando assim a solubilidade do fósforo.

4.5. CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que a dinâmica dos teores de fósforo (P) nos Cambissolos estudados está principalmente relacionada aos teores de sódio (Na) e cálcio (Ca). Nesses solos, os maiores teores de P estão associados a formas de P-Ca mais estáveis. Além disso, os extratores tradicionalmente recomendados para solos alcalinos, como o extrator de Olsen, revelaram-se ineficazes na estimativa do fósforo disponível, uma vez que não houve correlação significativa entre os valores de P extraídos e disponibilidade de P para as plantas. Esses resultados sugerem que os teores de P disponível, apesar de potencialmente elevados, são liberados juntamente com o efeito salino, e esse é predominante na fertilidade desses solos.

4.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao**, 1998, Rome, 300(9), D05109.

Alves De Oliveira LC, Carneiro MDA, Litter FA, Carvalho MAC, Yamashita OM, Caione GDA. Frações de fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo. **Rev. Agroneg. Meio Ambiente**. 2021; v. 14, n. 4, p. 1-15. DOI:10.17765/2176-9168.2021v14n4e8921.

Araújo MSB, Schaefer CEGR, Sampaio EVSB. Frações De Fósforo Após Extrações Sucessivas Com Resina E Incubação, Em Latossolos E Luvisolos Do Semi-Árido De Pernambuco. **R. Bras. Ci. Solo**. 2004; v. 28, n. 2, p. 259-268. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000200004>

Assunção SA, Pereira MG, Dortzbach D, Silva Neto EC da. Influence of parent material on organic phosphorus fractions in vineyard soils in Santa Catarina, Brazil. *Revista Ambiente & Água*, v. 15, p. e2546, 5 out. 2020. **Rev. Ambient. Água**. 2020; 15 (5). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2546>.

Braun S, Warrinnier R, Börjesson G, Ulén B, Smolders E, Gustafsson JP. Avaliando a capacidade dos testes de solo para estimar o fósforo lábil em solos agrícolas: evidências de troca isotópica. **Geoderma**, 2019; 337, 350-358. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.048>.

Calheiros AS, Silva JPS, Oliveira MW, Freire MBGS, Freire FJ. Nível crítico de fósforo por diferentes extratores químicos em Neossolo Flúvico alcalino cultivado com milho. **Rev. Bras. Ciênc. Agrár**. 2022; v. 7, n. 4, p. 590-596. <https://doi.org/10.5039/agraria.v7i4a1752>.

Carneiro KAA, Moro L, Macedo RS, Neto RN de A, Sousa C dos S, Bakker AP de. Fósforo disponível extraído por Mehlich¹ e Olsen em Luvisolo sob agroecossistemas do Semiárido brasileiro. **Rev. Bras. de Meio Ambiente**, 2023; v. 11, n. 1, 1 <https://doi.org/10.5281/zenodo.8023341>.

Castro FC, Santos AM dos, Araújo JF. Salinização dos Solos e Práticas Agrícolas na Comunidade Quilombola de Cupira em Santa Maria da Boa Vista, Pernambuco – Nordeste do Brasil. **Rev. Dep. Geogr**. 2021;41(1):e174478. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2021.174478>.

Chang SC e Jackson ML. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 1957, 84: 133-144.

Corrêa RM; Nascimento CWA; ROCHA AT. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Sci. Agron**. 2011; v. 33, p. 153-159. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i1.3129>.

Ding Z, Kheir AMS, Ali MGM, Ali OAM, Abdelaal AIN, Lin X, et al. The integrated effect of salinity, organic amendments, phosphorus fertilizers, and deficit irrigation on soil properties, phosphorus fractionation and wheat productivity. **Sci Rep**. 2020; 10:2736. doi:10.1038/s41598-020-59650-8

- Donagemma GK, Ruiz HA, Alvarez V. VH, Ker JC, Fontes MPF. Fósforo remanescente em argila e silte retirados de Latossolos após pré-tratamentos na análise textural. **Rev Bras Ciênc Solo**. 2008;32(4):1785–91. <https://doi.org/10.1590/S010006832008000400043>.
- Doydora S, Gatiboni L, Grieger K, Hesterberg D, Jones JL, McLamore ES, Peters R, Sozzani R, Van den Broeck L, Duckworth OW. Accessing Legacy Phosphorus in Soils. **Soil Systems**. 2020; 4(4):74. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4040074>.
- EMBRAPA- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária -. Manual de métodos de análises de solo. 2. ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.
- EMBRAPA- Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. rev. ampl. Brasília, DF, Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.
- Feitosa H de O, Lacerda CF de, Araújo IC da S, Ferreira FJ, Carvalho CM de, Marinho AB. Chemical Soil Attributes in a Rotating System under Salinity and Nitrogen Trials. **J. Exp. Agric. Int**. 2018; v. 21, n. 4, p. 1–11. DOI: 10.9734/JEAI/2018/39321.
- Gama DC, Jesus JB de. Principais solos da região Semiárida do Brasil favoráveis ao cultivo do Eucalyptus L’Heritier. **BIOFIX Sci. J**. 2020; v. 5, n. 2, p. 214-221. <http://dx.doi.org/10.5380/biofix.v5i2.70968>.
- Garcia G de O, Ferreira PA, Santos DB dos, Oliveira FG de, Miranda GV. Estresse salino em plantas de milho: I - macronutrientes aniônicos e suas relações com o cloro. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient**. 2021; v. 9, p. 26–30. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi>
- Gu C, Margenot AJ. Navigating limitations and opportunities of soil phosphorus fractionation. **Plant Soil**. 2021, 459, 13–17. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04552-x>
- Gu, C., Margenot, A.J. Navigating limitations and opportunities of soil phosphorus fractionation. **Plant Soil**. 2021; 459, 13–17. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04552-x>
- Gupta AK, Tripa LK, Patra PK. Distribution of phosphorus fractions in different soil orders of Indo-Gangetic plains of India. **Ann Plant Soil Res**. 2022; v. 24, n. 2, p. 221-225. <https://doi.org/10.47815/aprs.2022.10152>
- Harrell DL, Wang JJ. Fractionation and sorption of inorganic phosphorus in Louisiana calcareous soils. **Soil Sci**. 2006; 171(1), 39–51 DOI:10.1097/01.ss.0000187347.37825.46.
- Hedley MJ, Stewart JWB. & CHAUHAN, B.S. Changes in organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Sci. Soc. Am. J**. 1982; 46: 970-976.
- Helfenstein J, Pistocchi C, Oberson A, Tamburini F, Goll DS, and Frossard E. Estimates of mean residence times of phosphorus in commonly considered inorganic soil phosphorus pool. **Biogeosciences**, 2020; 17, 441–454, <https://doi.org/10.5194/bg-17-441-2020>.
- Hill JO, Simpson RJ, Moore AD, Graham P, Chapman DF. Impact of phosphorus application and sheep grazing on the botanical composition of sown pasture and naturalised, native grass pasture. **Aust J Agric Res**. 2004; 55(12):1213. <https://doi.org/10.1071/AR04090>.

- Iaaich H, Iben HOMA, Ahmed D, Rachid M, Rachid M. Digital soil mapping: case study from the Khouribga-Kasbat Tadla zone in Central Morocco. **Afr Medit Agric J.** 2021. doi:10.34874/IMIST.PRSM/afirmed-i132.31328
- IPA – Tabosa JN, Tavares Filho JJ, Brito ARMB, Nascimento MMA, Reis OV, Simplício JB. et al. O cultivo do sorgo no Semiárido de Pernambuco: aspectos gerais e recomendações básicas de plantio. Publicações/Folhetos Explicativos. p. 5. 2008.
- IPA- Instituto Agrônômico de Pernambuco- Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação. 3.ed. Recife, **IPA**, 2008. 212p.
- Jiang Y, Yan Q, Liu T, Xu Y, Han X, Ma X and Wang Y. Phosphorus adsorption characteristics and release risk in saline soils: a case study of Songnen Plain, China. **Front. Plant Sci.** 2023; 14:1302763. doi: 10.3389/fpls.2023.1302763.
- Lambers H. Phosphorus Acquisition and Utilization in Plants. *Annu Rev Plant Biol.* 2021. Vol. 73:17-42. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102720-125738>
- Lemming C, Oberson A, Magid J, Bruun S, Scheutz C, Frossard E, et al. Residual phosphorus availability after long-term soil application of organic waste. **Agric Ecosyst Environ.** 2019 ;270-271:65–75. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.10.009>
- Lemos J de O, Freire FJ, Souza Júnior VS de, Oliveira ECA de, Lucena PGC de, Silva SRV da, et al. Phosphorus fractions in soils with distinct mineralogy and their relationship with phosphate buffer capacity indicators in Brazil. **Acta Sci, Agron.** 2022; 44:e55148. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.55148>
- Liu L, Wang T, Wang L, Wu X, Zuo Q, Shi J, Sheng J, Jiang P, Chen Q, Ben-Gal, A. Plant water deficit index-based irrigation under conditions of salinity. **Agric Water Manag.** 2022; v.269, e107669. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107669>.
- Marques RP. Disponibilidade e fracionamento do fósforo em solos afetados por saís cultivado com sorgo forrageiro no Sertão do Pajeú. [dissertação]. UFRPE; 2014. 50p.
- Meyer G, Bell MJ, Doolette CL, Brunetti G, Zhang Y, Lombi E, Kopittke PM. Plant-Available Phosphorus in Highly Concentrated Fertilizer Bands: Effects of Soil Type, Phosphorus Form, and Coapplied Potassium. **J Agric Food Chem.** 2020; 68(29):7571-7580. doi: 10.1021/acs.jafc.0c01287.
- Moura MSB, Sá IIS, Silva TGF, Galvíncio JD, Ribeiro JG. Variação espacial da precipitação e temperatura do ar no Submédio São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. Anais... **Florianópolis: SBMET**, 2006.
- Mumbach, G.L., Gatiboni, L.C., Dall’Orsoletta, D.J. et al. Phosphorus Extraction with Soil Test Methods Affected by Soil P Sorption Capacity. **J Soil Sci Plant Nutr.** 2020; 1882–1890. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00259-1>
- Nóbrega JS, Guedes MA, Lima GS Gheyi HR, Soares LA dos A, Silva L de A, et al. Photosynthetic pigments, growth, and production of cherry tomato under salt stress and hydrogen peroxide. **Rev bras eng agríc ambient.** 2024;28(6):e275968. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n6e275968>
- O’halloran IP. Total and organic phosphorus. In: CARTER, M. R. Soil Sampling and Methods of Analysis. CSSS, Boca Raton, Florida, 1993. p.213-229.

Oliveira, LCA, Carneiro MDA, Litter FA, De Carvalho MAC, Yamashita OM, Caione G. Frações de fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo. **Rev Agroneg Meio Ambient.** 2021; v. 14, n. 4, p. 1-15. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n4e8921>

Olsen SL, e Sommers LE. Phosphorus, In: PAGE, A.L., ed. **Methods of soil analysis**, Part 2. 2nd ed. Madison WI, ASA and SSSA, 1982. p. 403-427. (Agron. Mongr. 9)

Olsen SR, Cole CV, Watenabe FS, Dean LA. **Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate.** Washington:USDA, 1954. 22p. (USDA. Circular, 939).

Pavinato PS, Rocha GC, Cherubin MR, Harris I, Jones DL, Withers PJA. Map of total phosphorus content in native soils of Brazil. **Sci agric.** 2020;78(6):e20200077. doi: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0077>

Paz-Ares J, Puga MI, Rojas-Triana M, Martinez-Hevia I, Diaz S, Poza-Carrión C, Minambres M, and Leyva A. Plant adaptation to low phosphorus availability: Core signaling, crosstalks, and Applied implications. **Mol. Plant.** 2022; 15, 104–124.

Pedrotti A, Chagas RM. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria**, v. 19, n. 2. 2015, p. 1308-1324. DOI: 10.5902/2236117016544

Penn CJ, Camberato JJ. A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. **Agriculture.** 2019; 9(6):120. <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>.

Pereira DS, Da Costa LM, Do Carmo DL, Rocha ACT. Availability and fractionation of phosphorus in soils with different physicochemical characteristics. **Rev Agro@Mambiente On-Line.** 2020; v.14, 13p. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v14i0.6811>

Pereira JR, Faria CMB. Sorção de fósforo em alguns solos do Semi-árido do Nordeste brasileiro. **Pesq Agropec Bras.** 1998; v. 33, p. 1179-1184. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/132824>.

Pereira TTC, Ker JC, Schaefer CEGR, Barros NF de, Neves JCL, Almeida CC. Gênese de latossolos e cambissolos desenvolvidos de rochas pelíticas do grupo Bambuí - Minas Gerais. **Rev Bras Ciênc Solo.** 2010 ;34(4):1283–95. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400026>

Pessoa Junior ESF, de Souza WB, Santana GP. Fracionamento Das Formas De Fósforo Em Terra Preta De Índio / Phosphorus Fractionation on ‘Terra Preta De Índio. **Bras Appl Sci Rev.** 2021;5(3):1368-83. <https://doi.org/10.34115/basrv5n3-007>.

Pinto LA da SR, Beutler SJ, Assunção SA, Rossi CQ, Guareschi RF, Zandoná SR, Santos OAQ dos, Pereira MG. Extração e quantificação das frações de fósforo orgânico no solo / Extraction and quantification of organic phosphorus fractions in soil. **Braz. J. Develop.** 2020 ;6(6):34260-78. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-102>.

Raiesi, Tahereh, and Ali Reza Hosseinpour. “Phosphorus Availability and Some Biological Properties in the Bean (*Phaseolus Vulgaris*) Rhizosphere.” **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 48, no. 5 (2017): 501–10. doi:10.1080/00103624.2016.1253712.

- Raij, B. Van. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. **R. bras. Ci. Solo.** 1978; 2: 1-9.
- Rawat PS, Das S, Shankhdhar D, Shankhdhar SC. Phosphate-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Phosphate Solubilization and Uptake. **J Soil Sci Plant Nutr.** 2021; 21, 49–68. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>
- Rheinheimer D dos S, Anghinoni I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesq agropec bras.** 2001;36(1):151–60. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000100019>.
- Rheinheimer DD, Somavilla A, Oliveira LB, Ticher T. Ciclo biogeoquímico do fósforo, diagnóstico de disponibilidade e adubação fosfatada. **Porto Alegre: Ed. Autores**, 2020; 71 p.
- Rheinheimer DS, Anghinoni I, Kaminski J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Rev. Bras. Ciênc. Solo.** 2000 v. 24, p. 345–354. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832000000200012>
- Ribeiro JE da S, Silva AGC, Coêlho E dos S, Oliveira PH de A, Silva EF da, Oliveira AKS de, et al. Melatonin mitigates salt stress effects on the growth and production aspects of radish. **Rev bras eng agríc ambient.** 2024;28(4):e279006. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n4e279006>.
- Ribeiro MR, Ribeiro Filho M, Jacomine KT. Origem e classificação dos solos afetados por sais. In: Gheyi HR, Dias NS, Lacerda CF, Gomes Filho E. (ed.). Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados. 2. ed. Fortaleza: **INCTSal**, 2016.
- Rocha AT da, Duda GP, Nascimento CWA, Ribeiro MR. Fracionamento do fósforo e avaliação de extratores do P-disponível em solos da Ilha de Fernando de Noronha. **Rev bras eng agríc ambient.** 2005; 9(2):178–84. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000200005>
- Rodrigues M, Pavinato PS, Withers PJ, Teles AP, Herrera WF. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Sci Total Environ.** 2016; 542, 1050-61. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.118.
- Rosa A, Caponi LH, Zanão Júnior LA. DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM UM LATOSSOLO VERMELHO EM FUNÇÃO DO pH DO SOLO. **Rev. Act. Igu.** 2000 ;5(5):108-15. <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v5i5.15975>
- Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, et al. Brazilian Soil Classification System. 2018 5ed. **Embrapa**, Brasília, DF, Brazil.
- Schneider F, Haderlein SB. Potential effects of biochar on the availability of phosphorus-mechanistic insights. **Geoderma.** 2016; 277:83–90. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.05.007>
- Shaheen SM, Tsadilas, CD e Stamatiadis, S. (2007). Inorganic phosphorus forms in some entisols and aridisols of Egypt. **Geoderma**, 2007; 142(1-2), 217–225. doi:10.1016/j.geoderma.2007.08.0
- Silva BA, Silva JS, Silva TI da, Costa R S. da, Castro, C. S. de ., Oliveira, L. K. B. de ., Sousa, T. R. M. de ., Rodrigues, C. Y. A. C., Cardoso, F. B., & Mesquita, R. O. Bioestimulant with *Ascophyllum nodosum* and fulvic acids as mitigating factors of salinity damage in

soybean. **Rev Bras Eng Agríc Ambient.** 2024; v.28(4), e278961. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n4e278961>

Sims AL, Fabrizzi KP, Kaiser D, Rosen CJ, Vetsch JA, Strock JS et al. Soil phosphorus balance in Minnesota soils and its effects on soil test phosphorus and soil phosphorus fractions. **Soil Sci Soc Am J.** 2023; 87(4):918-931. doi: 10.1002/saj2.20549.

Souza FG, Farias SAR, Ferreira Filho JG de A, Brito KQD. Comportamento dos teores de sais em perfil de solo com vegetação nativa e cultura irrigada. **Rev Verde Agroecol Desenvol Sust.** 2016; v. 2, pág. 60–65. <https://doi.org/10.18378/rvads.v11i2.4049>

Souza Júnior RF de, Oliveira FHT de, Santos HC, Freire FJ, Arruda JA de. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Rev Bras Ciênc Solo.** 2012;36(1):159–70. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100017>

Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG. **Manual de métodos de análise de solo**- Embrapa – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.: il.

Venegas-González J, Alicia Velázquez-Machuca MA, Luís Pimentel-Equihua J, Luís Montañez-Soto J, Méndez-Inocencio C. Comparative Study of Four Techniques for the Labile Phosphorus Extraction and Critical Level for Corn Growth in Vertisols. **Adv. Biores.** 2014; v5, 46-53; DOI: 10.15515/abr.0976-4585.5.4.4653.

Vieira MDS, Oliveira FHTD, Gurgel MT, Santos HC, Tavares HAM. Phosphorus Sorption Isotherms In Soils Of The Semiarid Region Of Brazil. **Rev. Caatinga.** 2021;34(1):166–76. <https://doi.org/10.1590/198321252021v34n117rc>.

Wang Y, Luo D, Xiong Z, Wang Z, Gao M. Changes in rhizosphere phosphorus fractions and phosphate-mineralizing microbial populations in acid soil as influenced by organic acid exudation. **Soil Tillage Res.** 2023; 225, 105543. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105543>.

Wang Y, Zhang W, Müller T, Lakshmanan P, Liu Y, Liang T, et al. Soil phosphorus availability and fractionation in response to different phosphorus sources in alkaline and acid soils: a short-term incubation study. **Sci Rep.** 2023;v. 13, n. 1, p. 5677. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31908-x>.

Xie W, Yang J, Gao S, Yao R, Wang X. The Effect and Influence Mechanism of Soil Salinity on Phosphorus Availability in Coastal Salt-Affected Soils. **Water.** 2022; 14(18):2804. <https://doi.org/10.3390/w14182804>.

Zhu J, Li M, Whelan M Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: a review. **Sci Total Environ.** 2018. 612:522–537. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.095>.

5. ARTIGO 2

CARACTERIZAÇÃO E CORREÇÃO DE SOLOS AFETADOS POR MAGNÉSIOPARA A PRODUÇÃO DE SORGO FORRAGEIRO NO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO.

RESUMO

O manejo de solos afetados por magnésio (Mg) segue princípios semelhantes aos aplicados em solos afetados por sódio (Na). Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes condicionadores de salinidade em solo saturado por magnésio sobre os atributos morfológicos e fisiológicos do sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.)). O experimento foi realizado em casa de vegetação na Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, em delineamento de blocos casualizados, com dois ciclos de 60 dias e sete tratamentos (lodo de laticínios, gesso, lodo de laticínios + gesso, produto comercial Biofol®, Biofol® + gesso, biochar de cama de frango e testemunha, sem condicionador). Cada tratamento contou com três repetições, utilizando vasos de 5 dm³ com 7 kg de solo e uma planta de sorgo por vaso. O solo, classificado como Planossolo, foi escolhido devido à alta concentração de Na e Mg. Ao final de cada ciclo, as propriedades do solo e das plantas foram analisadas. O uso de condicionadores demonstrou correlação significativa na redução da porcentagem de sódio trocável (PST), da porcentagem de magnésio trocável (PMT) e da saturação de Na+Mg, com destaque para os tratamentos com lodo de laticínios e lodo + gesso. Além de melhorar os parâmetros do solo, esses tratamentos influenciaram positivamente características zootécnicas, como altura das plantas, número de folhas, peso verde e seco das folhas, comprimento das raízes e peso verde. No segundo ciclo, o tratamento com lodo + gesso reduziu em mais de 40% a argila dispersa e os teores de Mg²⁺, resultando em uma resposta positiva das plantas. Esses resultados indicam a importância de testar diferentes tempos de incubação para maximizar os benefícios dos condicionadores no solo.

Palavras-chave: Condicionadores de salinização, Saturação por magnésio, Resíduos orgânicos.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION AND CORRECTION OF SOILS AFFECTED BY MAGNESIUM FOR FORAGE SORGHUM PRODUCTION IN THE SEMIARID REGION OF PERNAMBUCO.

The management of soils affected by magnesium (Mg) follows similar principles to those applied to sodium (Na)-affected soils. This study aimed to evaluate the effect of different salinity conditioners on Mg-saturated soil and their impact on the morphological and physiological attributes of forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.)). The experiment was conducted in a greenhouse at the Federal University of Agreste of Pernambuco, using a randomized block design with two 60-day cycles and seven treatments (dairy sludge, gypsum, dairy sludge + gypsum, the commercial product Biofol®, Biofol® + gypsum, poultry litter biochar, and a control without conditioner). Each treatment had three replicates, using 5 dm³ pots filled with 7 kg of soil and one sorghum plant per pot. The soil used, classified as Planosol, was selected for its high Na and Mg concentrations. Soil properties and plant attributes were evaluated at the end of each cycle. The use of soil conditioners showed a significant correlation with the reduction of the exchangeable sodium percentage (ESP), exchangeable magnesium percentage (EMP), and Na+Mg saturation, with dairy sludge and dairy sludge + gypsum treatments standing out. In addition to improving soil parameters, these treatments positively influenced plant variables such as height, number of leaves, fresh and dry leaf weight, root length, and fresh weight. In the second cycle, the dairy sludge + gypsum treatment reduced dispersed clay and Mg²⁺ levels by over 40%, resulting in a positive plant response. These findings highlight the importance of testing different incubation times to maximize the benefits of soil conditioners.

Keywords: Salinity conditioners, Magnesium saturation, Organic residues.

5.1. INTRODUÇÃO

Em solos salinos, o sódio geralmente predomina entre os cátions, independentemente do tipo de salinização. Contudo, em alguns solos, a proporção de magnésio pode ser superior ao sódio (Chernousenko et al., 2023). Essa variação de cátions pode estar associada à formação de classes de solos como Planossolos, Neossolos, Vertissolos, Gleissolos e Cambissolos (Ribeiro et al., 2016). De acordo com a WRB (2015), os planossolos são caracterizados por altos teores de sódio trocável e, ocasionalmente, íons de magnésio. Essas classes de solos são encontradas no Agreste de Pernambuco e apresentam limitações significativas em termos de fertilidade e propriedades físicas.

De acordo com o Andreeva et al. (2020) solos afetados por sais podem ser divididos em cinco grupos principais: solos com grande quantidade de sais solúveis em água; solos com alta alcalinidade e alto percentual de sódio trocável (PST); Solos com alto teor de magnésio (Mg) na solução do solo; Solos com forte acúmulo de gesso ou sulfato de cálcio; solo de sulfato ácido com acumulação de sulfato de ferro ou alumínio altamente ácido. A saturação por magnésio é relatada por alguns pesquisadores, que afirmam que sua presença no complexo de absorção do solo mantém a propriedade de salinidade e pode formar solos específicos, e sugerem a utilização da saturação por magnésio como um indicador da salinidade do solo (Andreeva et al., 2020).

Altos níveis de magnésio podem causar efeitos deletérios na estrutura do solo, semelhantes ao sódio, provocando aumento na dispersão de partículas de argila e diminuição correspondente na condutividade hidráulica do solo, provocando a formação de crostas, erosão e restringindo a absorção de nutrientes pelos vegetais, causando efeitos negativos nas características morfológicas e fisiológicas da planta (Qadir et al., 2018).

A remediação e o manejo dos solos afetados por magnésio seguem os mesmos princípios aplicáveis aos solos sódicos. A estratégia principal é aumentar os níveis de cálcio (Ca) no solo, aliviando os efeitos do excesso de magnésio (Mg), sódio (Na) ou qualquer outro cátion em excesso (Bello et al., 2021). A aplicação de gesso agrícola, é o método mais usual em Pernambuco, sendo o principal produto utilizado para elevação dos teores de Ca e redução dos teores de Mg, podendo também ser utilizadas outras fontes de fertilizantes ricas em cálcio, como fosfatos, nitratos e silicatos.

O enriquecimento dos solos com resíduos orgânicos é uma prática que pode aumentar o conteúdo de nutrientes disponíveis, melhorar as características químicas do solo

e promover o crescimento das plantas. Essa medida é benéfica do ponto de vista ambiental, econômico e agrônomo. Exemplos incluem esterco bovino, de aves e adubos orgânicos. A aplicação de biochar nos solos, por exemplo, traz múltiplos benefícios para a agricultura. No entanto, a eficácia do biochar depende de variáveis como a biomassa fonte, a temperatura de pirólise, a taxa de aplicação e sua viabilidade econômica (Rekaby et al., 2020).

Dentre as alternativas de insumos disponíveis no Agreste de Pernambuco, estão os resíduos das agroindústrias locais, como os resíduos de laticínios, substâncias húmicas, “humatos” e o biochar, obtido a partir do processamento bioquímico ou físico-químico, respectivamente, de resíduos orgânicos. Ao utilizar de ácido húmico e fúlvico para avaliar a melhora do crescimento e o rendimento da cevada em condições de solo salino, Alsudays et al. (2024) observaram melhoria das propriedades físicas, biológicas e químicas do solo, o que leva a uma maior disponibilidade de nutrientes para as plantas, melhora a qualidade dos frutos, melhora a fertilidade do solo, observando potencial redutor no efeito nocivo da salinidade.

Uma abordagem eficaz para viabilizar a produção vegetal em áreas afetadas pela salinidade é o cultivo de espécies tolerantes a essas condições adversas. Nesse contexto, o sorgo (*Sorghum bicolor* L.) destaca-se como uma cultura de crescente relevância em diversas regiões globais, sendo uma alternativa estratégica em sistemas agrícolas susceptíveis ao estresse salino. Sua importância se deve, principalmente, à sua elevada tolerância tanto à salinidade quanto à seca, características que o tornam uma escolha robusta para enfrentar os desafios impostos nestas condições (Ding et al., 2018).

Informações atuais sobre as implicações econômicas da degradação do solo por salinidade são restritas aos impactos sobre a produção de culturas, e praticamente inexploradas no Brasil quando se refere a solos afetados por Mg. Objetivou-se com este trabalho avaliar o impacto dos teores elevados de magnésio sobre a fertilidade dos solos e produtividade do sorgo forrageiro em solos do Agreste de Pernambuco, e, a eficácia do uso de condicionadores orgânicos e minerais de solos na remediação da saturação por Mg dos solos da região.

5.2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Município de Garanhuns, Brasil. Utilizando sorgo forrageiro do IPA

variedade-467-4-2, e solo salino com saturação por magnésio. Adotou-se um Delineamento Inteiramente Casualizado, com sete tratamentos, sendo eles, lodo de laticínio, gesso agrícola, humato comercial, lodo de laticínio + gesso agrícola, gesso agrícola + humato comercial, biochar de cama de frango e o tratamento testemunha sem nenhum tipo de condicionador. Cada tratamento com três repetições, cada repetição era composta por um vaso de 5 L, contendo 7 kg de solo e uma planta, os tratamentos foram avaliados em dois ciclos, cada ciclo com 60 dias de período experimental.

A coleta do solo escolhido para a condução do experimento foi realizada no Município de Altinho-PE, na profundidade de 0-20 cm. O solo foi classificado como Planossolo háplico eutrófico solodico (Santos 2015), e caracterizado quanto a sua concentração de Na e Mg, como solo saturado por Magnésio, conforme descrito por Santos (2015) tabela 1.

Tabela 1. Propriedades químicas e físicas das amostras de solo analisadas.

pH	Ca ⁺	Mg ⁺	K ⁺	Na ⁺	S.B	Al ³⁺	H+Al	CTC	Ca:Mg	V	M	PST	PMT	COT	Argila
	----- (cmolc kg-1)					-----					----- %		----- (g Kg-1)		
6,2	6,8	15,2	0,1	2,3	24,4	0,4	2,1	26,5	0,45	92	2	9	57,36	7,00	469

(S.B.) – Soma de Bases; (CTC) – Capacidade de troca de cátions a pH 7; (COT) – Carbono orgânico total; (V) – Saturação por bases; (m) – Saturação por alumínio (PMT)-porcentagem de magnésio trocável.

Fonte: Santos (2015).

O lodo utilizado no experimento foi coletado na DPA Nestlé no município de Garanhuns – PE. Na tabela 1 está a caracterização do lodo conforme Caseiro (2018) e métodos exigidos pela resolução 375/2006-CONAMA.

Tabela 2. Caracterização do lodo de laticínios.

pH	NT	NA	NO ₃	NO ₂	P	Cd	Na	K	Pb	Zn	S	Ca	COT	CT
	-----mg kg ⁻¹ -----												----- % NMP g ⁻¹	
8,53	7070	2,8	60	10	7470	0,1	18600	3250	2,61	436	4510	21200	1,39	850
	Conama 357/2006 VMP													
-	-	-	-	-	-	39	-	-	300	2800	-	-	-	1000

NT: Nitrogênio Total; NA: Nitrogênio amoniacal; COT: Carbono orgânico total; CT: Coliformes Termotolerantes. **Fonte:** Laboratório Bioagri Ambiental Ltda.

A dose de lodo de laticínio foi aplicada de acordo com taxa de aplicação máxima anual definida pela resolução 375/2006 do CONAMA, o gesso segundo IPA (2008), o produto comercial de acordo as recomendações do fabricante, e o biochar com 20 t ha⁻¹.

O gesso utilizado foi processado a partir da Gipsita e disponibilizado no mercado (gesso de construção triturado), o humato comercial utilizado foi o Byofol®. O biochar foi produzido a partir do resíduo de cama de frango por meio da combustão incompleta pelo processo chamado de pirólise lenta, em um forno pequeno térmico caseiro com dois cilindros: cilindro A e cilindro B, o qual foi baseado num modelo amplamente utilizado pelos agricultores tailandeses (Oliveira, et. al. 2020). Para a aplicação do biochar, este foi modificado por tratamento com Ácido Fosfórico e Peróxido de Hidrogênio, conforme métodos propostos por SAHIN., et al (2017) e ZADEH., et al (2018) visando a sua acidificação e remoção de sais, com seu pH inicial era de 7,63 foi acidificado com peróxido de hidrogênio tendo seu pH final em 5,87.

A dose de gesso foi dimensionada de acordo com Rocha (2008) equivalente a 0,8 Mg ha⁻¹; a dose de biochar foi equivalente a 20 Mg ha⁻¹; e o humato comercial foi equivalente a 2,0 dm³ ha⁻¹, conforme recomendação do fabricante.

Para calcular a dose de lodo, se levou em consideração a densidade ($d = 0,038 \text{ g cm}^{-3}$), a umidade (96,15%) e dimensionou-se de acordo com resolução do CONAMA, onde a dose é calculada a partir do valor de Nitrogênio total do resíduo, sendo assim, a dose equivalente foi de 20,711 Mg ha⁻¹.

O solo foi seco, peneirado e acondicionado nos vasos, onde o mesmo permaneceu por 15 dias inerte, sem a incorporação de água e semente. No decimo quinto dia após o condicionamento do solo no vaso, os solos foram umedecidos com 80% da capacidade de pote, fator que foi mantido durante todo o período experimental.

No décimo sexto dia após o acondicionamento do solo no vaso, ocorreu a incorporação do adubo de fundação, de acordo a necessidade do solo e segundo as recomendações do IPA (2008). Consequentemente foi realizado o semeio 10 sementes de sorgo forrageiro por vaso, em cova, a profundidade de 3 cm. Dez dias após o plantio das sementes, ocorreu o desbaste das plântulas, deixando apenas uma planta por vaso, as plantas de maior e menor tamanho foram descartadas, objetivando uma padronização, dando início ao primeiro ciclo de avaliação, Ciclo I. No décimo dia após o início por período experimental do Ciclo I, ocorreu a adubação de cobertura, seguindo as recomendações do IPA (2008). Após 60 dias do início do Ciclo I o solo e as plantas foram avaliados. Para o início do Ciclo II, houve um intervalo de 20 dias, e posteriormente a implantação no mesmo solo já trabalhado no Ciclo I, e os tratos culturais ocorreram semelhante ao Ciclo I. Vale ressaltar que, durante todo

o período de cultivo vegetal, os cuidados diários foram estabelecidos, entre eles a retiradas de invasoras, avaliação de umidade do solo, averiguação de pragas, entre outros.

Ao final de cada ciclo foram coletadas amostras de solos de cada vaso para caracterizá-los química e fisicamente (Embrapa, 2017). O solo foi seco e peneirado na peneira de 2 mm. Foram determinadas as bases trocáveis em Ca^{2+} e Mg^{2+} por extração com Cloreto de Potássio (KCl) e quantificadas por titulação; Na^+ e K^+ pelo método de Mehlich e determinados por fotômetro de chamas. Posteriormente foi determinado pH em H_2O e KCl, conforme EMBRAPA (2017). No extrato da pasta saturada foram determinados os teores das bases solúveis, Ca e Mg, por titulação; Na e K determinados por fotômetro de chamas; extração da acidez potencial por acetato de cálcio, pH e CE. Fisicamente foi determinado os teores de Argila e Argila Dispersa em Água (ADA), também conforme Embrapa, 2017.

A partir desses dados foram calculados os valores de Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e a Porcentagem de Sódio Trocável (PST), também conforme metodologia descrita por Embrapa (2017). Além desses, foram calculados os indicadores da salinidade por magnésio, sendo eles, a Porcentagem de Magnésio Trocável (PMT), a relação $\text{Ca}^{2+}:\text{Mg}^{2+}$ e a saturação por sódio + magnésio, conforme metodologia descrita por Andreeva (2011).

Em ambos os ciclos de cultivo vegetal, as variáveis de parte aérea avaliadas foram: altura de planta (AP), utilizando régua graduada, onde foi considerado a distância entre o solo até a ponta da folha mais alta não estendida; número de folhas por planta (NF); número de perfilhos (NP); largura de folha (LF), medida do terço médio da primeira folha totalmente expandida, utilizando régua graduada; comprimento de folha (CF), medida da primeira folha totalmente expandida, utilizando régua graduada; foi considerada como folha totalmente expandida, aquela que apresentava a exposição da lígula. Após as avaliações de parte aérea, as plantas foram retiradas dos vasos e os órgãos vegetais destacados para avaliações de peso verde de folha (PVF), peso seco de folha (PSF). No sistema radicular, após lavagem em água corrente e posterior desnovelamento das raízes, a maior raiz foi mensurada (CR), determinando o comprimento com auxílio de régua graduada, onde foi considerada a distância entre colo da planta até a meristema radicular da raiz mais longa estendida. Posteriormente, procedeu-se a avaliação de peso verde de raiz (PVR) e peso seco da raiz (PSR) (Santos et al., 2024). Para determinação da produção de massa vegetal, as amostras da parte aérea e raiz das plantas foram pesadas antes e após a secagem em estufa de circulação de ar forçada, a 55°C por 72 h.

Todos os dados do Ciclos I e II foram submetidos à análise de variância, as médias entre os grupos de tratamentos avaliadas por contraste ortogonal. A diferença entre os tratamentos foi comparada pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, avaliando a média de ambos os ciclos de avaliação. De forma complementar análises de contraste ortogonal, e a análise de componente principal, em cada ciclo de avaliação e entre as médias dos dois ciclos de solo e das plantas.

5.3. RESULTADOS

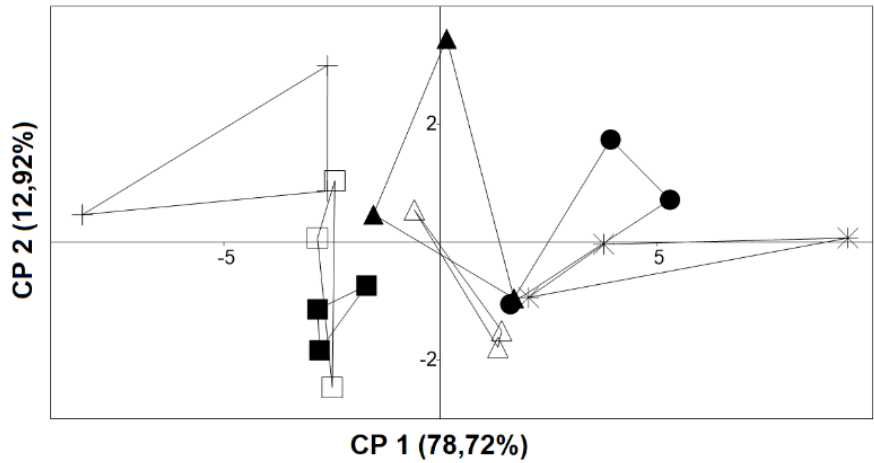
A complexidade dos dados é apresentada na análise de componente principal (CP) entre os condicionadores por ciclos de avaliação nas características referentes ao solo, no ciclo de coleta I, o CP 1 explica 78,72% e o CP 2 12,92% da variação total dos dados (figura 1a) é possível observar um agrupamento dos tratamentos lodo de laticínio, lodo+gesso e gesso agrícola, para o ciclo dois o CP 1 explica 74,90% e o CP 2 17,90% da variação total (Figura 1b) existe uma maior aproximação do loto de laticínio e do lodo+gesso, e quando analisamos a média dos dois ciclos (figura 1c) a variação total dos dados é explicada por 54,54%(CP 1) e 24,74% para o CP 2, observamos novamente a proximidade do tratamento lodo de laticínio e lodo+gesso.

Para o primeiro ciclo aos 60 dias (Tabela 3), verificou-se que a saturação de Na+Mg foi reduzida nos tratamentos com lodo de laticínios (41,69%), gesso (43,05%) e lodo + gesso (43,90%), em comparação à testemunha (49,11%). A PMT também apresentou valores significativamente menores nos tratamentos com lodo de laticínios (40,48%) e gesso (42,91%), representando reduções de 13,15% e 7,94%, respectivamente, em relação à testemunha. A PST foi significativamente menor nos tratamentos com gesso e lodo + gesso, com reduções de 96,79% e 80,32%, respectivamente, quando comparados à testemunha. A CE foi inferior nos tratamentos com gesso (1,35 dS m⁻¹), com uma redução de 11,76%, e biochar (1,30 dS m⁻¹), com uma redução de 15,03%, indicando uma diminuição na salinidade do solo nesses tratamentos.

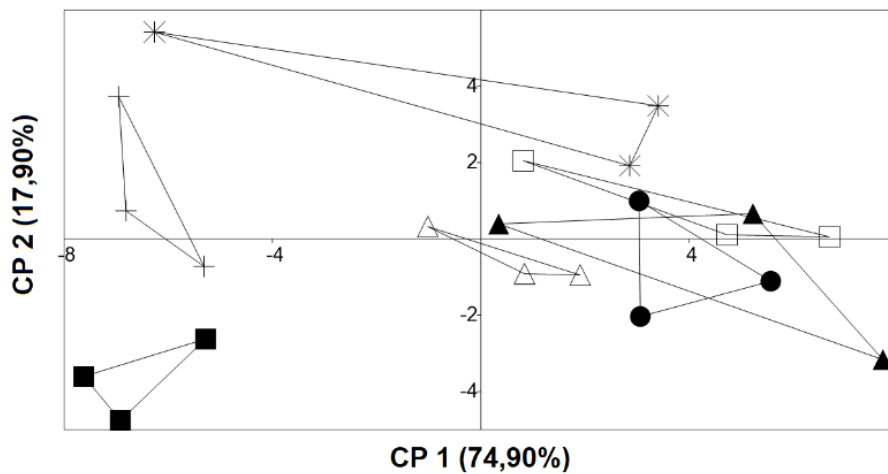
No segundo ciclo experimental (Tabela 3), os tratamentos com lodo + gesso e lodo de laticínios resultaram em uma redução significativa na saturação de Na+Mg, com decréscimos médios de 9,49% e 9,18%, respectivamente, em comparação ao tratamento controle. A ADA foi reduzida no tratamento com lodo + gesso (7,75%) em relação ao controle (13,86%), representando uma redução de aproximadamente 44,08%. A PST foi significativamente maior no tratamento com lodo de laticínios (8,29%), apresentando um aumento médio de 54,38% em comparação ao controle (5,37%).

No quesito de indicadores da saturação por magnésio, PMT que no primeiro ciclo teve redução nos tratamentos lodo de laticínios e gesso, já no segundo teve um destaque maior nos tratamentos lodo de laticínios e lodo + gesso em relação a testemunha, respectivamente, lodo de laticínios (45,03%) e lodo + gesso (46,92%) (Tabela 3).

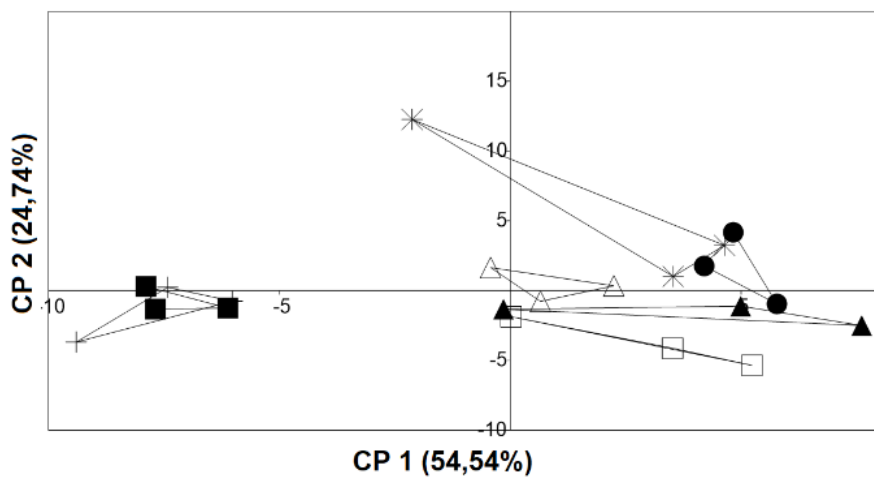
Figura 1. Análise de componente principal (CP) por ciclo de coleta das características química e física dos solos afetados por sais e aplicados diferentes condicionadores de salinização mineral e orgânicos, aos 60 dias de cada ciclo.



a)



b)



c)

A: Ciclo de coleta I; B: Ciclo de coleta II; C: Média dos ciclos de coleta I e II; +: Lodo de laticínio; ×: Biochar; □: Gesso; Δ: Comercial ■: lodo+Gesso; ▲: Gesso+comercial; ●: Testemunha.

Tabela 3. Caracterização química e física de um solo afetado por magnésio na presença de condicionadores orgânicos e minerais (lodo de laticínios, gesso, lodo + gesso, comercial, comercial + gesso, biochar e testemunha) no período de 60 dias (Ciclo 1) e 120 dias.

Tratamentos	Na+Mg%.....	PMT	ADA	PST (dS m ⁻¹)	CE
Ciclo 1					
Lodo de laticínio	41,69 Cb	40,48 Bb	15,55 Aa	1,21 Ab	2,01 Ab
Gesso	43,05 Cb	42,91 Bb	15,34 Aa	0,08 Bb	1,35 Ab
Lodo + gesso	43,90 Cb	43,41 Bb	13,36 Aa	0,49 Bb	2,25 Aa
Comercial	45,84 Bb	44,51 Bb	14,23 Aa	1,34 Ab	1,56 Ab
Comercial + gesso	46,31 Bb	44,35 Bb	16,05 Aa	1,96 Ab	1,57 Ab
Biochar	50,32 Ab	48,63 Aa	15,87 Aa	1,70 Ab	1,30 Aa
Testemunha	49,11 Ab	46,61 Ab	16,51 Aa	2,49 Ab	1,53 Ab
Ciclo 2					
Lodo de laticínio	53,32 Ba	45,03 Ca	11,20 Ba	8,29 Aa	3,15 Aa
Gesso	59,92 Aa	53,36 Aa	15,93 Aa	6,55 Aa	3,03 Aa
Lodo + gesso	53,14 Ba	46,92 Ca	7,75 Cb	6,23 Ba	2,66 Aa
Comercial	56,00 Ba	50,36 Ba	13,44 Aa	5,64 Ba	3,16 Aa
Comercial + gesso	59,89 Aa	54,74 Aa	15,20 Aa	5,15 Ba	2,92 Aa
Biochar	57,07 Aa	51,16 Ba	17,21 Aa	5,91 Ba	2,07 Aa
Testemunha	58,71 Aa	53,34 Aa	13,86 Aa	5,37 Ba	3,55 Aa
CV(%)	2,94	2,83	10,06	3,74	2,29

*Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. Na+Mg: Saturação de Na + Mg; PMT: porcentagem de magnésio trocável; ADA: Argila Dispersa em Água; CE: Condutividade elétrica; PST: Porcentagem de Sódio Trocável.

A análise dos dados (Tabela 4) demonstra uma comparação entre os tratamentos e a testemunha ao longo dos Ciclos 1 e 2, bem como as médias gerais dos tratamentos e controle durante ambos os ciclos. No Ciclo 1, foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos condicionadores e o tratamento testemunha para as variáveis de sódio e magnésio solúvel e trocável, razão de adsorção de sódio, porcentagem de magnésio trocável e saturação de sódio e magnésio. No Ciclo 2, significância estatística foi evidenciada para a condutividade elétrica e porcentagem de sódio trocável, e ao compararmos os dois ciclos e a testemunha, vemos diferença significativa para o teor de magnésio trocável.

No Ciclo 1 (60 dias) não houve diferença significativa entre os tratamentos com condicionadores e a testemunha para a condutividade elétrica, os tratamentos com condicionadores apresentaram uma redução significativa no Na⁺ com a aplicação dos condicionadores ($t = -7,63^*$), redução de aproximadamente 54,29% em relação à testemunha,

foi observada uma quantidade significativamente maior de Na ($t = 4,44^{**}$), indicando um possível aumento na mobilidade do sódio no solo, em aproximadamente 51,96% em relação à testemunha. Os teores de Mg^{+} reduziram significativamente ($t = -2,99^{*}$) aproximadamente 8,10% em relação à testemunha, a PMT reduziu em aproximadamente 4,59% em relação à testemunha, a saturação combinada de sódio e magnésio foi significativamente menor ($t = -3,53^{**}$) cerca de 6,82% em comparação com a testemunha, a argila dispersa foi significativamente menor nos tratamentos com condicionadores ($t = -7,63^{*}$).

Aos 120 dias, a condutividade elétrica foi significativamente menor nos tratamentos com condicionadores ($t = -0,95^{**}$), uma redução de aproximadamente 11,09% em relação à testemunha, houve uma redução significativa no sódio solúvel com a aplicação dos condicionadores ($t = -5,21^{**}$), corroborando os achados do primeiro ciclo, a quantidade de magnésio solúvel foi significativamente menor nos tratamentos com condicionadores ($t = -3,83^{**}$), foi observado uma diminuição significativa no magnésio trocável ($t = -3,16^{**}$), sugerindo uma continuação dos efeitos observados no primeiro ciclo, o mesmo ocorreu para argila dispersa em água (ADA), e RAS que reduziu cerca de 24,37% em relação ao tratamento testemunha.

No Ciclo I, Ciclo II e na comparação das médias dos ciclos de avaliação, os condicionadores de salinização minerais e orgânicos apresentaram diferenças positivas em relação ao tratamento testemunha nas características fisiológicas e morfológicas da parte aérea e raiz do sorgo forrageiro (Tabela 5). Esse resultado evidencia a importância e funcionalidade dos diferentes condicionadores de salinização na remediação química do solo, favorecendo o desenvolvimento da planta.

Tabela 5, os resultados mostram que os condicionadores de solo, melhoraram significativamente a maioria das características morfológicas e fisiológicas das plantas de sorgo, com destaque para variáveis como altura da planta, número de folhas, número de perfilhos, largura da folha, comprimento da folha, peso verde e seco da folha. Observou-se um aumento significativo na altura das plantas tratadas com condicionadores em ambos os ciclos de coleta. No ciclo 1, a altura média das plantas com condicionadores foi de 79,75 cm comparada a 57,67 cm na testemunha, indicando que a altura das plantas com condicionadores foi aproximadamente 38,27% maior do que no tratamento testemunha para o ciclo 1. Este aumento permaneceu consistente no ciclo 2, embora não significativo, com as plantas tratadas alcançando uma altura média de 84,67 cm contra 78,33 cm da testemunha, em média, 8,09% maior que no tratamento testemunha.

O número de folhas foi significativamente maior nas plantas tratadas com condicionadores em ambos os ciclos. No ciclo 1, as plantas com condicionadores apresentaram uma média de 15,50 folhas em comparação a 9,00 folhas na testemunha ($t = 4,31^{**}$), e no ciclo 2, as médias foram 12,05 e 8,00 folhas, respectivamente ($t = 3,59^*$).

As plantas tratadas com condicionadores exibiram um aumento significativo tanto no peso verde quanto no peso seco das folhas. No ciclo 1, o peso verde das folhas (PVF) foi significativamente maior ($t = 14,36^{**}$), assim como o peso seco das folhas (PSF) ($t = 9,46^{**}$). Esses aumentos foram também observados no ciclo 2, com valores t de 7,46^{**} para PVF e 7,19^{**} para PSF.

O CR apresentou um incremento significativo ao longo dos ciclos, especialmente no ciclo 1, onde foi observado um aumento de cerca de 22,91% em relação ao tratamento testemunha. No segundo ciclo, o uso de condicionadores resultou em um crescimento de aproximadamente 15,40% comparado ao controle. Considerando a média geral, a aplicação de condicionadores promoveu um acréscimo de 24,61% no comprimento radicular, evidenciando a eficácia dos tratamentos ao longo do experimento.

Conseqüentemente, os resultados mostraram que tanto o PVR, quanto o PSR, apresentaram aumentos significativos nas plantas tratadas com condicionadores em comparação com o tratamento testemunha, em ambos os ciclos de coleta.

No PVR, observou-se um aumento percentual de 156,77% no Ciclo 1 (C1), 89,98% no Ciclo 2 (C2) e 123,39% no geral, indicando uma melhoria substancial no desenvolvimento radicular das plantas tratadas com condicionadores. No Ciclo 1, o PSR nas plantas tratadas com condicionadores foi de 4,08 g, comparado a 1,12 g no tratamento testemunha, resultando em um aumento percentual de 264,29% ($t = 9,12^{**}$, $p < 0,01$). No Ciclo 2, o PSR foi de 5,55 g nas plantas tratadas, em contraste com 1,99 g na testemunha, refletindo um aumento percentual de 178,89% ($t = 8,83^{**}$, $p < 0,01$). De maneira geral, o PSR apresentou um aumento de 230,83% nas plantas tratadas com condicionadores em comparação com o tratamento testemunha.

A análise de componente principal (CP) ilustra a variabilidade dos dados morfológicos e fisiológicos das plantas de sorgo forrageiro entre os condicionadores por ciclo de avaliação, o ciclo 1. O ciclo 1 (Figura 2a), o primeiro componente principal (CP 1) explica 71,72% da variação total dos dados, e o componente principal (CP 2) explica 11,13%, é observado entre

os condicionadores em relação ao tratamento testemunha uma clara separação, indicando efeitos diferenciados desses tratamentos no ciclo I.

No ciclo II (figura 2b) o componente principal (CP 1) explica 83,04% da variação total, componente principal (CP 2) explica 5,73%, é notável que ainda segue uma separação dos tratamentos, porém existe uma alteração, possivelmente devido a redução da eficiência do condicionador do tratamento comercial, e uma aproximação dos tratamentos lodo de laticínio, lodo+gesso e biochar.

Para os dois ciclos de coleta (Figura 2c), o primeiro componente principal (CP 1) explica 73,63% e o segundo componente principal (CP 2) explica 8,97% da variação total, mostrando um distanciamento dos tratamentos mencionados em relação aos demais tratamentos (Figura 2c), evidenciam o destaque destes condicionares lodo de laticínio, lodo+gesso e biochar em todo o período experimental, além disso, é possível observar que os tratamentos gesso ou que combinam gesso e comercial formam agrupamentos específicos em áreas distintas, o que sugere que a combinação de condicionadores pode ter um efeito sinérgico nas características das plantas,

A tabela 6 mostra as médias dos ciclos de avaliação para variáveis de maior interesse zootécnicos (altura de planta, número de folha e perfilhos, largura e comprimento de folha, peso verde e seco de folha, comprimento de raiz, peso verde e seco de raiz, os condicionadores lodo de laticínio e lodo de laticínio+gesso, obtiveram destaque.

No Ciclo 1, para a variável altura da planta, os tratamentos com lodo + gesso, que resultaram em uma altura de 92,50 cm, e com biochar, que resultaram em uma altura de 92,00 cm, promoveram os maiores incrementos em comparação ao tratamento testemunha. O tratamento com lodo + gesso apresentou um aumento de 56,78% na altura da planta em relação à testemunha, enquanto o tratamento com biochar proporcionou um aumento aproximado de 55,93%. O tratamento lodo de laticínio se destacou com uma largura de folha (LF) superior, com um aumento significativo de 49,43% em comparação com a testemunha, seguido do tratamento lodo+gesso com aumento de cerca de 25,84%. Para peso verde das folhas o lodo + gesso (79,60 g) e lodo (74,95 g), seguido do tratamento biochar mostraram maior peso verde das folhas, e com isso também resultaram em um peso seco das folhas (PSF) superior. O tratamento com lodo + gesso, lodo e comercial obtiveram um maior comprimento da maior raiz (CR).

Aos 120 dias, no Ciclo 2, o tratamento lodo de laticínio apresentou alturas de planta superiores (96,50 cm) respectivamente, 26,14% em comparação a testemunha, maiores números de folhas, e maior peso verde das folhas, respectivamente lodo (87,45 g) e lodo + gesso (100,14 g).

Tabela 4. Comparação entre grupos de médias por contraste ortogonal por ciclo de coleta das características químicas e físicas de um solo afetado por magnésio na presença dos tratamentos lodo de laticínios, gesso, lodo + gesso, comercial, comercial + gesso, biochar e testemunha no período de 60 dias (Ciclo 1) e 120 dias (Ciclo 2).

Tratamento	CE	Na	Mg	Mg ⁺	Na ⁺	RAS	PST	PMT	Na+Mg	ADA
	ds m ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹				%				
Cond. C1	1,73	1,95	0,74	6,53	0,16	2,45	1,11	43,95	45,07	14,67
Test. C1	1,45	1,35	0,56	7,10	0,35	1,97	2,31	46,06	48,37	15,63
Cond. C2	2,81	1,22	0,88	6,30	0,79	1,52	6,19	49,34	55,53	13,42
Test. C2	3,16	1,71	1,39	6,86	0,65	1,71	5,01	52,96	57,97	14,42
Cond. Geral	2,27	1,58	0,81	6,42	0,48	1,98	3,65	46,65	50,29	14,05
Test. Geral	2,31	1,53	0,97	6,98	0,50	1,84	3,65	49,51	53,17	15,03
Geral	2,28	1,57	0,84	6,49	0,48	1,96	3,65	47,05	50,71	14,18
Condicionadores C1 vs Testemunha C1										
Test t	1,73ns	4,44**	3,34**	-2,99*	-7,63*	2,41*	-7,55**	-2,14*	-3,53**	-7,63*
Condicionadores C2 vs Testemunha C2										
Test t	-0,95**	-5,21**	-3,83**	-3,16**	2,49*	1,21ns	2,68*	-2,67	-1,682s	2,49*
Condicionadores geral vs Testemunha geral										
Test t	-0,10ns	0,19ns	-0,98ns	-3,18**	-0,13ns	0,42ns	-0,03ns	-1,69ns	-1,06ns	-1,13ns

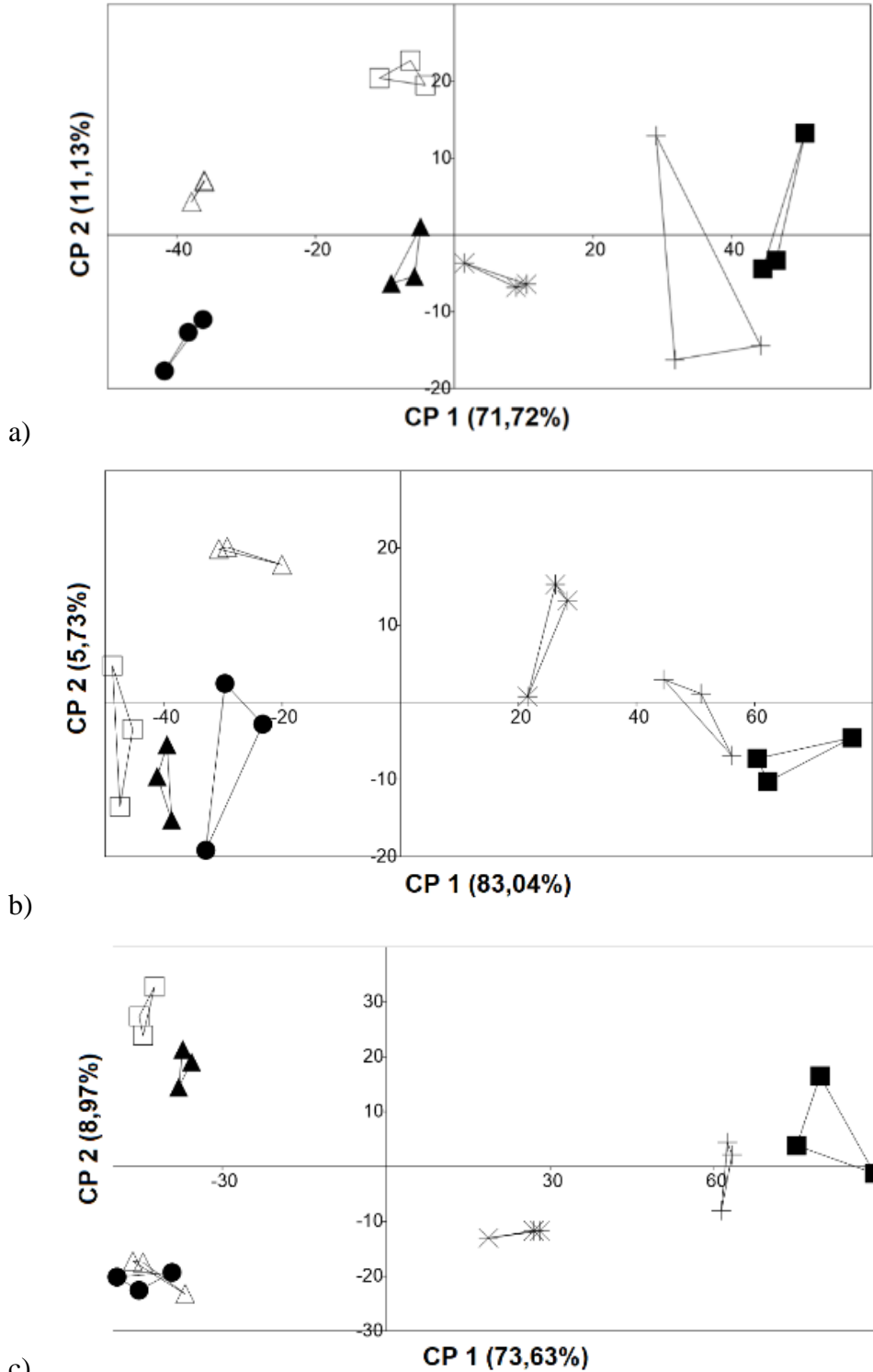
Cond: Condicionadores orgânicos e minerais; Test: Testemunha; C1: ciclo 1; C2: Ciclo 2; CE: Condutividade elétrica; Na: Na solúvel; Mg: Magnésio solúvel; Mg⁺: trocável; ADA: argila dispersa em água; RAS: Razão de Adsorção de Sódio; PST: Porcentagem de Sódio Trocável; PMT: Porcentagem de Magnésio Trocável; Na+Mg: Saturação de sódio e magnésio.

Tabela 5. Comparação entre grupos de médias por contraste ortogonal por ciclo de coleta das características morfológicas e fisiológicas de plantas de sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.)), aos 60 dias de cada ciclo, após a germinação, sob o cultivo de solos afetados por Mg e aplicados diferentes condicionadores de salinização minerais e orgânicos (Lodo de laticínio, Lodo de laticínio+Gesso, Biochar, Gesso, Produto comercial+Gesso, Produto comercial e Testemunha).

	AP	NF	NP	LF	CF	PVF	PSF	CR	PSR	PVR
Cond. C1	79,75	15,50	2,50	5,53	76,17	46,30	6,82	76,61	4,08	23,18
Test. C1	57,67	9,00	2,33	4,13	68,67	14,42	2,14	62,33	1,12	9,03
Cond. C2	84,67	12,05	1,83	5,47	78,00	53,03	8,73	80,78	5,55	38,99
Test. C2	78,33	8,00	1,00	4,50	82,33	31,08	4,55	70,00	1,99	20,52
Cond. Geral	81,25	17,00	2,83	5,85	80,57	48,34	7,16	79,75	4,39	25,31
Test. Geral	62	11,50	3,00	4,80	71,50	17,49	2,35	64,00	1,33	11,33
Geral	78,5	16,21	2,86	5,70	79,27	43,94	6,47	77,50	3,95	23,31
Condicionadores C1 Vs Testemunha C1										
Test t	7,14**	4,31**	0,34ns	2,95*	1,82ns	14,36**	9,46**	2,81*	9,12**	13,37**
Condicionadores C2 Vs Testemunha C2										
Test t	1,18ns	3,59*	4,33**	1,61ns	-1,73ns	7,46**	7,19**	4,28**	8,83**	8,59**
Condicionadores Geral Vs Testemunha Geral										
Test t	7,21**	3,57*	-0,41ns	2,73*	3,06*	9,08**	7,81**	3,09*	10,51**	7,12**

C1: Ciclo 1; C2: Ciclo 2; Cond: Tratamentos com condicionadores de solo orgânicos e minerais; Test: Tratamento testemunha, sem condicionadores de solo; AP: Altura da planta; NF: Número de folha; NP: Número de perfilhos; LF: Largura da folha; CF: Comprimento da folha ; PVF: Peso verde da folha; PSF: Peso seco da folha; CR: Comprimento da maior raiz; PSR: Peso seco da raiz; PVR: Peso verde da raiz ns: Não significativo; e * e **: Significativos a 5% e 1% de probabilidade pelo teste t, respectivamente

Figura 2. Análise de componente principal (CP) por ciclo de coleta das variáveis morfológicas e fisiológicas de plantas de sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.)), aos 60 dias de cada ciclo, após a germinação, sob o cultivo em solos afetados por sais e aplicados diferentes condicionadores de salinização mineral e orgânicos.



c) A: Ciclo de coleta I; B: Ciclo de coleta II; C: Média dos ciclos de coleta I e II; +: Lodo de laticínio; ×: Biochar; □: Gesso; △: Comercial ■: lodo+Gesso; ▲: Gesso+comercial; ●: Testemunha.

Tabela 6. Características morfológicas e fisiológicas de plantas de sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.)) cultivado em solos afetados por sais e aplicados diferentes condicionadores de salinização minerais e orgânicos.

TRATAMENTO	AP	NF	LF	CF	NP	PVF	PSF	CR	PSR	PVR
Ciclo 1										
LODO	79,00 Ab	26,50 Aa	6,65 Aa	81,00 Aa	5,00 Aa	74,95 Ab	12,01 Ab	61,00 Cb	5,64 Bb	31,05Ab
GESSO	80,00 Aa	8,00 Ca	4,85 Aa	83,50Aa	1,00 Ba	35,30 Ba	4,03 Ca	91,50 Aa	3,00 Ca	20,67 Ba
LODO+GESSO	92,50 Aa	22,00 Ba	5,6 Aa	73,00 Bb	4,00 Aa	79,60 Ab	11,63 Ab	80,00 Ba	8,00 Aa	27,24 Ab
COMERCIAL	55,50 Ba	8,00 Ca	4,5 Aa	67,62Bb	1,00 Ba	16,30 Cb	3,17 Ca	83,50 Bb	1,94 Da	14,45 Bb
COMERCIAL+GESSO	87,00 Aa	12,50 Ca	5,4 Aa	71,0 Ba	2,00 Ba	32,02 Ba	4,23 Ca	71,00 Ca	1,83 Da	16,54 Ba
BIOCHAR	92,00 Aa	19,50 Ba	5,25 Ab	78,75 Ab	3,00 Aa	41,57 Bb	6,77 Bb	67,50 Cb	3,96 Cb	29,47 Ab
TESTEMUNHA	59,00 Bb	8,50 Ca	4,45 Aa	71,51 Bb	2,00 Ba	14,06 Cb	1,94 Cb	61,50 Ca	1,31 Da	8,97 Cb
Ciclo 2										
LODO	96,50 Aa	18,50 Bb	6,40 Aa	69,00 Bb	3,50 Ab	87,45 Ba	17,42 Aa	77,00 Ca	12,88 Aa	58,06 Ba
GESSO	83,00 Aa	8,00 Ca	4,35 Ba	68,00 Bb	1,00 Ba	13,87 Eb	0,99 Db	75,50 Cb	2,18 Ca	17,72 Ea
LODO+GESSO	88,50 Aa	24,50 Aa	7,01 Aa	86,50 Aa	4,00 Aa	100,14 Aa	17,75 Aa	72,50 Ca	7,98 Ba	70,66 Aa
COMERCIAL	95,00 Aa	7,50 Ca	5,00 Ba	84,50 Aa	1,00 Ba	29,71 Da	3,61 Ca	92,50 Aa	2,30 Ca	26,17 Da
COMERCIAL+GESSO	72,00 Aa	7,00 Cb	3,90 Ba	72,00 Aa	1,00 Ba	24,23 Da	1,29 Db	79,50 Ca	1,30 Ca	15,64 Aa
BIOCHAR	85,00 Aa	10,00 Cb	7,71 Aa	91,50 Aa	1,00 Bb	60,91 Ca	11,46 Ba	83,00 Ba	7,13 Ba	48,37 Ca
TESTEMUNHA	76,50 Aa	7,50 Ca	4,75 Ba	82,00 Aa	1,00 Ba	29,47 Da	4,14 Ca	68,50 Ca	1,74 Ca	18,89 Ea
CV(%)	9,13%	14,63	13,74	5,09	31,28	10,47	13,97	5,47	13,52	9,32

AP: Altura da planta; NF: Número de folha; LF: Largura de folha; CF: Comprimento de folha; NP: Número de perfilhos; PVF: Peso verde da folha; PSF: Peso seco da folha; CR: Comprimento da maior raiz; PVR: Peso verde da raiz; PSR: Peso seco da raiz; e as médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

5.4. DISCUSSÃO

A proximidade do tratamento lodo de laticínio e lodo+gesso observados na Figura 1, demonstra um indicativo de que esses tratamentos possuem um impacto similar nas características químicas e físicas do solo em ambos os ciclos.

Os dados apresentados na Tabela 3 demonstram que a adição de condicionadores no segundo ciclo de avaliação influenciou a dispersão da argila no solo. Solos com altas concentrações de magnésio e sódio tendem a dispersar, enquanto solos com maiores teores de cálcio tendem a flocular (Czyz & Dexter, 2015). A aplicação do tratamento lodo + gesso resultou em uma redução significativa da dispersão da argila, evidenciada pela diminuição quase pela metade da argila dispersa em água (ADA) em comparação com o tratamento testemunha. Esse efeito pode ser atribuído ao papel do gesso, que adiciona cálcio ao solo e reduz o sódio trocável, e à matéria orgânica, que também contribui para a floculação do solo (Arruda et al., 2021; Zaka et al., 2018).

A eficácia do tratamento lodo + gesso é corroborada pelos resultados de Taha e Abd Elhamed (2021), que indicam que a aplicação conjunta de gesso e matéria orgânica à camada superficial do solo é mais eficaz do que a aplicação isolada de gesso. Além de reduzir a dispersão da argila, a combinação de lodo e gesso promove o aumento da matéria orgânica e da porosidade do solo. Adicionalmente, a matéria orgânica pode acelerar a lixiviação de sódio, melhorando a estabilidade dos agregados do solo em água e reduzindo a PST, como demonstrado por Meng et al. (2019).

O magnésio é considerado semelhante ao Ca nos solos, possuem a mesma valência, no entanto, adsorvem com forças diferentes às partículas do solo e, portanto, afetam a floculação e a estabilidade estrutural do solo de maneira diferente. Esta diferença pode ser entendida em termos das propriedades químicas do cálcio e do magnésio que influenciam a força relativa da sua adsorção às partículas do solo e, conseqüentemente, o seu impacto nas propriedades físicas do solo (Qadir et al., 2018).

Os tratamentos que receberam os condicionadores gesso e lodo+gesso expressaram no solo 1(Tabela 3) os menores valores da porcentagem de sódio trocável (PST), comportamento observado por El-Kamar (2020) que estudou o efeito da adição de condicionadores de solo (composto, gesso e biofertilizante, isolados ou combinados), os resultados mostraram uma diminuição da Razão de Adsorção de Sódio (RAS) e do Porcentual de Sódio Trocável (PST) em todos os tratamentos. Esse efeito é explicado pela liberação de ácidos orgânicos que

promovem a dissolução e liberação de íons Ca^{2+} . O aumento da concentração de Ca^{2+} na solução do solo substitui o sódio trocável, melhorando assim a qualidade química do solo. Ademais, a presença de matéria orgânica em solos afetados por sais pode acelerar a lixiviação de sódio, aumentando a estabilidade dos agregados do solo em água e diminuindo a porcentagem de sódio trocável, conforme demonstrado por Meng et al. (2019).

O comportamento do aumento dos teores de Na^+ e Mg nos tratamentos com biochar, conforme mostrado na Tabela 3, é semelhante ao observado por Costa et al. (2019). Esse estudo demonstrou que diferentes doses de biochar podem causar salinização secundária do solo devido à liberação de nutrientes como K , Ca e Mg para a solução do solo, não existe informações suficientes sobre o desempenho a longo prazo de solos salinos tratados com biochar (Hussien Ibrahim et al., 2020). Ibrahim et al. (2021), ao investigarem a eficácia do biochar na mitigação dos efeitos negativos da salinidade em mudas de sorgo (*Sorghum bicolor* L.), observaram que o biochar mostrou ser mais útil para aliviar o efeito da salinidade nos parâmetros de crescimento das mudas. Acredita-se que essa mitigação esteja relacionada à capacidade do biochar de liberar nutrientes minerais e reduzir o estresse osmótico, promovendo, assim, uma maior disponibilidade de água no solo e melhorando as condições de crescimento das plantas.

O uso de biochar além de melhorar a fertilidade do solo, melhora a estabilidade da agregação do solo, a capacidade de troca catiônica do solo (CTC), os nutrientes do solo e a capacidade de retenção de água e, portanto, melhora significativamente o crescimento e a produção das culturas (Sher et al., 2022; Kabirinejad e Hoodaji et al., 2012).

Os tratamentos que receberam lodo de laticínio apresentaram menor porcentagem de magnésio trocável, respectivamente, 40% e 45% (Tabela 3), Vyshpolsky et al. (2010) em um estudo realizado para reversão do quadro de salinidade por magnésio utilizando fosfogesso na cultura do algodão, demonstraram que o aumento dos níveis de cálcio forçou o equilíbrio químico em favor do cálcio, substituindo o excesso de magnésio trocável do solo, e que além de uma diminuição na porcentagem de magnésio trocável do solo, teve aumento na disponibilidade de nutrientes (fósforo e enxofre) e melhoria na estabilidade estrutural do solo, os efeitos benéficos da aplicação de fosfogesso no solo foram claros no rendimento das culturas, a primeira safra de algodão rendeu $2,7 \text{ t ha}^{-1}$ no tratamento com aplicação de fosfogesso.

Comparando as Tabelas 3 e 4, observamos que os condicionadores de solo, em geral, mostraram efeitos benéficos na melhoria das propriedades químicas e físicas do solo afetado por magnésio. Os resultados indicam que tratamentos como lodo de laticínios, gesso e suas combinações podem reduzir a saturação de $\text{Na}+\text{Mg}$ e a concentração de magnésio trocável, melhorando a qualidade do solo para o cultivo. Essas variações são dependentes do ciclo de coleta, sugerindo uma influência temporal nos efeitos dos tratamentos aplicados ao solo, uma vez que o mesmo solo foi utilizado em ambos os ciclos de avaliação, evidenciando o fator tempo de ação dos condicionares (de forma geral, não destacando nenhum tratamento), quanto a remediação do solo salino e ação positiva no desenvolvimento vegetal.

Além disso, a redução da argila dispersa em água e da porcentagem de sódio trocável nos tratamentos com lodo + gesso e gesso sugere uma melhora na estrutura e estabilidade do solo, essencial para o desenvolvimento das plantas.

A clara separação entre os tratamentos e a testemunha nos componentes principais indica a importância dos condicionadores na remediação de solos salinos e no suporte ao desenvolvimento das plantas (figura 2). Saqib et al. (2020), ao investigar o efeito melhorador do ácido húmico (AH) com gesso em culturas de arroz e trigo sob condições de solo com estresse salino (salino-sódico), observou que a adição de gesso e ácido húmico melhorou notavelmente as propriedades físicas e químicas do solo, reduzindo significativamente a CE, e o pH, com isto, essas propriedades alteradas do solo produziram condições de crescimento favoráveis para plantas estressadas, o que se refletiu na melhoria da altura das plantas, perfilhos e o peso dos grãos.

Taha e Abd Elhamed (2021) mencionam o efeito positivo dos condicionadores sobre a matéria orgânica dos solos, esse aumento da matéria orgânica do solo provem das melhorias das propriedades do solo pelos condicionadores do solo, que por sua vez aumentaram o crescimento das raízes das plantas (tabela 6).

A disponibilidade de nutrientes é afetada pelas condições salinas presente no solo, Rekaby et al. (2020) observou que a aplicação de condicionadores orgânico no solo, melhora significativamente a disponibilidade de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K).

Nos solos salinos, o uso de produtos e resíduos orgânicos, condicionadores de salinidade, possibilita melhor atividades das comunidades microbianas, microrganismo-planta, contribuindo para um maior desenvolvimento vegetal, principalmente na fase inicial da planta (Mabrouk et al., 2023).

5.5. CONCLUSÃO

Os tratamentos com lodo de laticínios, lodo + gesso e biochar destacaram-se tanto no solo quanto na planta, apresentando melhores resultados em comparação aos tratamentos minerais e ao controle. Os dados morfológicos do sorgo forrageiro indicam que solos com excesso de magnésio limitam o crescimento da cultura, pois o magnésio, assim como o sódio, provoca a dispersão das partículas do solo, dificultando a absorção de água e nutrientes pelas plantas.

No segundo ciclo, o tratamento lodo + gesso reduziu a argila dispersa em água em mais de 50% e diminuiu os teores de Mg^{2+} , o que resultou em uma resposta positiva da planta. Esses resultados sugerem que os efeitos benéficos podem ser mais evidentes com um maior tempo de incubação dos tratamentos, o que justifica a necessidade de testar diferentes tempos de incubação para otimizar a absorção dos resíduos pelas plantas.

5.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alsudays IM, Alshammary FH, Alabdallah NM, Alatawi A, Alotaibi MM, Alwutayd KM, Alharbi MM. Et al. Applications of humic and fulvic acid under saline soil conditions to improve growth and yield in barley. **Bmc plant biol.** 2024 mar24, 191. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04863-6>
- Alves HKMN, Jardim AMRF, Araújo Júnior GN, Souza CAA, Leite RMC, Silva GIN, Souza LSB, Silva TGF. Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no semiárido brasileiro. **Rev. Bras. Geogr. Fis.** V.1, n.01 (2022) 373-392.
- Amombo E, Ashilenje DS, Abdelaziz Hirich, Lamfeddal Kouisni, Abdallah Oukarroum, cherki ghoulam, et al. Exploring the correlation between salt tolerance and yield: Research advances and perspectives for salt-tolerant forage sorghum selection and genetic improvement. **Plant** 255, 71 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00425-022-03847-w>
- Andreeva N, Filcheva E, Hristov B. Composition of organic matter in magnesium saline soils from sofia field. **Soil sci.** 2011, n. 1-4, p. 64-67.
- Andreeva, NATALIYA. Determination of magnesium salinity in belozem region, bulgaria. **Bulg. J. Soil sci.** 2020, v. 5, n. 1, p. 11-22.
- Arruda FK, Dalbem E, Jennifer SKA. Matéria orgânica do solo e sua relação com diferentes texturas do solo. **Rev cient eletron cienc apl**, v. 1, p. 1-12, 2021.
- Babla M, Katwal U, Yong MT, Jahandari S, Rahme M, Chen ZH, et al. Value-added products as soil conditioners for sustainable agriculture. **Resour. Conserv. Recycl.** 2022, v. 178, p. 106079. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106079>.
- Bello SK, Alayafi AH, Al-solaimani SG, Abo-elyousr KAM. Mitigating soil salinity stress with gypsum and bio-organic amendments: A review. **Agronomy.** 2021; 11(9):1735. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091735>.
- Bhat BY. Breeding forage sorghum. In: Breeding sorghum for diverse end uses. **Woodhead publishing**, 2019. P. 175-191. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-101879-8.00011-5>.
- Caseiro KLG. Uso de lodo de laticínios no sorgo granífero cultivado em casa de vegetação. Universidade federal do agreste de pernambuco. 2019.
- Chernousenko GI, Khitrov NB, Pankova EI. Magnesium in saline gypsum-bearing soils of russia. **Eurasian soil sci.** 2023 jul 1;56(7):854-67. <https://doi.org/10.1134/s1064229323600537>.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente- Conama (2006). Resolução conama 357/06.
- Czyż EWAA, Dexter AR. Mechanical dispersion of clay from soil into water: Readily-dispersed and spontaneously-dispersed clay. **Int. Agrophys.** 2015, 29, 31-37. Doi: 10.1515/intag-2015-0007.
- Ding Z, Kheir AMS, Ali MGM, Ali OAM, Abdelaal AIN, Lin X, et al. The integrated effect of salinity, organic amendments, phosphorus fertilizers, and deficit irrigation on soil

properties, phosphorus fractionation and wheat productivity. **Sci rep.** 2020, 10, 2736. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59650-8>.

El-kamar F. Evaluation of some soil conditioners on some properties of salt affected soil and wheat productivity and quality. **J. Soil sci. Agric. Eng.** 2020; 11(7): 307-314. Doi: 10.21608/jssae.2020.109576

Elmeknassi M, Elghali D, De Carvalho HWP, Laamrani A, Benzaazoua M. A review of organic and inorganic amendments to treat saline-sodic soils: Emphasis on waste valorization for a circular economy approach. **Sci. Total environ.** 2024; p. 171087, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv>.

El-ramady H, Prokisch J, Mansour H, Bayoumi YA, Shalaby TA, Veres S, Brevik EC. Review of crop response to soil salinity stress: Possible approaches from leaching to nano-management. **Soil syst.** 2024; 8(1):11. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010011>

Gondek M, Weindorf, d. C., thiel, c., & kleinheinz, g. Soluble salts in compost and their effects on soil and plants: A review. **Compost sci. Util.** 2020,28(2), 59–75. (2020). <https://doi.org/10.1080/1065657x.2020.1772906>

Hussien Ibrahim ME, Adam Ali AY, Zhou G, Ibrahim Elsiddig AM, Zhu G, Ahmed Nimir NE, et al. Biochar application affects forage sorghum under salinity stress. **Chil. J. Agric. Res.** 2020; v. 3, 317-325. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-58392020000300317>.

Instituto brasileiro de geografia e estatística-IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola: Estatística da produção agrícola.** Dez. 2023. Brasília: IBGE, 2024.

Instituto brasileiro de geografia e estatística-IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola: Tabela 4 -produção de cereais, leguminosas e oleaginosas -comparação entre as safras 2022 e 2023.** Brasília: IBGE, 2023.

Ibrahim MEH, Adam Ali AY, Elsiddig AMI, Zhou G, Nimir NEA, Agbna GHD, et al. Mitigation effect of biochar on sorghum seedling growth under salinity stress. **Pak. J. Bot.** 2020;15;53(2).

Instituto nacional do semiárido-INSA. **O semiárido brasileiro.** Disponível em: <https://www.gov.br/insa/pt-br/semiario-brasileiro>

Instituto agrônômico de Pernambuco-IPA. **Recomendação de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação,** 2008.

Mabrouk O, Hamdi H, Sayadi S, Al-ghouti MA, Abu-dieyeh MH, Zouari N. Reuse of sludge as organic soil amendment: Insights into the current situation and potential challenges. **Sustainability.** 2023; 15(8):6773. <https://doi.org/10.3390/su15086773>.

Manual de métodos de análise de solo / paulo César teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. Ed. Rev. E ampl. – Brasília, DF: **Embrapa**, 2017.

Meng QF, Ma X, Zhang J, e Yu Z. The long-term effects of cattle manure application to agricultural soils as a natural-based solution to combat salinization. **Catena.** 2019; 175, 193-202. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.022>

Oliveira JB, Valente E, Stephanie J, Duda GP, Costa DP, Félix RF, et al. Impacto do biochar de resíduos da indústria de biodiesel sobre os atributos de um solo arenoso. **Rev. Bras. Geogr. Fis.** 2020; 29;13(5):2128–38.

Qadir M, Schubert S, Oster JD, Sposito G, Minhas PS, Cheraghi SAM, et al. High-magnesium waters and soils: Emerging environmental and food security constraints. **Sci. Total environ.** 2018; v. 642, p. 1108–1117. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.090>

Rekaby SA, Awad MYM, Hegab SA, Eissa MA. Effect of some organic amendments on barley plants under saline condition. **J. Plant nutr.** 2020; 43(12), 1840–185. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1750645>

Ribeiro MR, Ribeiro Filho M, Jacomine KT. Origem e classificação dos solos afetados por sais. In: Gheyi hr, dias ns, lacerda cf, gomes filho e. (ed.). Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. 2. Ed.fortaleza: **Inctsal**, 2016.

Rocha AT, Oliveira AC, Rodrigues AN, Júnior MAL, Freire FJ. Emprego do gesso do araripe na melhoria do ambiente radicular da cana-de-açúcar. **Rev. Bras. Cienc. Agrárias.** 2008; v. 3, n. 4, p. 307-312. <https://doi.org/10.5039/agraria.v3i4a282>.

Sahin O, Taskin MB, Kaya EC, Atakol O, Emir E, Inal A, Gunes A. Effect of acid modification of biochar on nutrient availability and maize growth in a calcareous soil. **Land use manag.** 2017; v. 33, n. 3. 447-456. <https://doi.org/10.1111/sum.12360>.

Sahin U, Kiziloglu FM, Abdallah AH, Badaou AN, Sabtow HA, Canbolat MY. Use of a stabilized sewage sludge in combination with gypsum to improve saline-sodic soil properties leached by recycled wastewater under freeze-thaw conditions. **J. Environ. Manage.** 2020; 15;274:111171. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111171>.

Santos TM, Santos PM, Araújo VL, Donizetti JGS, Negreiros Neto JV, Faria AFG, et al. Morfogênese de híbridos de sorgo para pastejo em função do espaçamento entre linhas. **Rev. Verde agroecol. Desenvolv. Sustent.** 2024; v. 19, n. 2, p. 80-85.

Santos, HG [et al.]. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5. Ed. Rev e ampl. Brasília, df: **Embrapa**, 2015.

Saqib AI, Ahmed K, Naseem AR, Qadir G, Nawaz MQ, Khalid M, et al. Integrated use of humic acid and gypsum under saline-sodic conditions. **Pak. J. Agric. Res.** 2020;33(2). Doi: 10.17582/journal.pjar/2020/33.3.684.691.

Sher A, Adnan M, Sattar A, Ul-allah S, Ijaz M, Hassan MU, Manaf A, Qayyum A, Elesawy BH, Ismail KA, et al. Combined application of organic and inorganic amendments improved the yield and nutritional quality of forage sorghum. **Agronomy.** 2022; 12(4):896. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040896>.

Taha MB, e Abd Elhamed AS. Some agricultural practices for improving the productivity of moderately sodic soil i: Soil properties and wheat vegetative growth. **Sci. Arch.** 2021; v. 2(4), 287-297. <http://dx.doi.org/10.47587/sa.2021.2404>.

Teixeira, paulo César et al. **Manual de métodos de análise de solo.** 2017.

Uss working group wrb, 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. **Fao**, roma.

Vyshpolsky F, Mukhamedjanov K, Bekbaev U, Ibatullin S, Yuldashev T, Noble AD, et al. Optimizing the rate and timing of phosphogypsum application to magnesium-affected soils for crop yield and water productivity enhancement. **Agric. Water manag.** 2010; 1;97(9):1277–86. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.02.020>.

Zadeh FS, Parichehreh M, Jalili B, Bahmanyar MA. Rehabilitation of calcareous saline-sodic soil by means of biochars and acidified biochars. **Land degrad. Dev.** 2018;29(10):3262–71. <https://doi.org/10.1002/ldr.3079>.

Zaka MA, Khalil A, Hafeezullah R, Muhammed S, Helge S. Effect of compost and gypsum for amelioration of saline sodic soil in rice wheat cropping system. **Asian j. Agric. And biol.** 2018; 6(4), 514-523.

6. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nos solos alcalinos, a disponibilidade de fósforo (P) é uma questão complexa e frequentemente desafiadora. Observações recentes indicam que os teores de P estão fortemente influenciados pelos níveis de sódio (Na) e cálcio (Ca) presentes no solo, essas formas de fósforo são predominantes e mais estáveis nestes tipos de solo. Essa estabilidade faz com que métodos convencionais de extração de fósforo, como o extrator de Olsen, sejam ineficazes para estimar a quantidade de P disponível para as plantas. Portanto, é crucial adotar práticas de manejo que considerem a dinâmica entre o efeito salino e a fertilidade do solo, visando otimizar a disponibilidade de P para as culturas.

O excesso de magnésio (Mg) no solo pode prejudicar muito o crescimento das plantas, como vimos no cultivo de sorgo forrageiro. Assim como o sódio, o magnésio faz com que o solo fique disperso, dificultando a absorção de água e nutrientes pelas plantas. Encontrar um remediador para solos saturados por magnésio é essencial para tornar essas áreas novamente produtivas, beneficiando pequenos, médios e grandes produtores. Isso pode ajudar a aumentar a nutrição do rebanho, melhorar a produção animal e elevar a renda do produtor, com custos menores em comparação com a adubação química. Tratamentos com resíduos orgânicos, como lodo de laticínios, lodo combinado com gesso, têm mostrado bons resultados tanto para o solo quanto para as plantas. Em destaque, o tratamento com lodo e gesso reduziu bastante a dispersão da argila e os níveis de magnésio, criando um ambiente mais favorável para o crescimento das plantas. Esse tratamento apresentou benefícios duradouros, que continuaram no ciclo de cultivo seguinte, porém, para obter o máximo desses benefícios, é recomendável testar diferentes tempos de aplicação desses tratamentos, para garantir que os resíduos sejam bem aproveitados desde o primeiro plantio.