



**HOSANA AGUIAR FREITAS DE ANDRADE**

**CORREÇÃO DO SOLO E CULTURAS DE COBERTURA  
COMO ESTRATÉGIAS PARA A PRODUÇÃO  
SUSTENTÁVEL DA SOJA NO CERRADO DO  
MARANHÃO**

**TERESINA – PI**

**2025**

**HOSANA AGUIAR FREITAS DE ANDRADE**

**CORREÇÃO DO SOLO E CULTURAS DE COBERTURA COMO ESTRATÉGIAS  
PARA A PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DA SOJA NO CERRADO DO MARANHÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, na área de concentração de Manejo de Espécies Vegetais, para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador

Dr. Henrique Antunes de Souza

Coorientadores

Dra. Rosa Maria Cardoso Mota de Alcântara

Dra. Mariléia Barros Furtado

**TERESINA – PI**

**2025**

FICHA CATALOGRÁFICA  
Universidade Federal do Piauí  
Biblioteca Comunitária Jornalista Carlos Castello Branco  
Divisão de Representação da Informação

A554c Andrade, Hosana Aguiar Freitas de.  
Correção do solo e culturas de cobertura como estratégias para a produção sustentável da soja no cerrado do Maranhão / Hosana Aguiar Freitas de Andrade. -- 2025.  
135 f.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Teresina, 2025.  
“Orientador: Dr. Henrique Antunes de Souza”.

1. Agricultura conservacionista. 2. Calcário. 3. Ciclagem de nutrientes. 4. Fertilidade do solo. 5. Gesso agrícola. I. Souza, Henrique Antunes de. II. Título.

CDD 630

HOSANA AGUIAR FREITAS DE ANDRADE

**CORREÇÃO DO SOLO E CULTURAS DE COBERTURA COMO ESTRATÉGIAS PARA A  
PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DA SOJA NO CERRADO DO MARANHÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

APROVADA em 29 de janeiro de 2025

Comissão Julgadora:

 Documento assinado digitalmente  
**EDVALDO SAGRILLO**  
Data: 06/02/2025 15:04:19-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Edvaldo Sagrilo - EMBRAPA Meio-Norte

 Documento assinado digitalmente  
**JOSE OSCAR LUSTOSA DE OLIVEIRA JUNIOR**  
Data: 06/02/2025 07:52:05-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. José Oscar Lustosa de Oliveira Júnior - EMBRAPA Meio-Norte

 Documento assinado digitalmente  
**RICARDO SILVA DE SOUSA**  
Data: 05/02/2025 19:46:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Ricardo Silva de Sousa - UFPI

 Documento assinado digitalmente  
**MILTON FERREIRA DE MORAES**  
Data: 05/02/2025 17:26:29-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes - UFMT

 Documento assinado digitalmente  
**MARILEIA BARROS FURTADO**  
Data: 05/02/2025 15:59:21-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Mariléia Barros Furtado - UFMA

 Documento assinado digitalmente  
**HENRIQUE ANTUNES DE SOUZA**  
Data: 06/02/2025 15:38:28-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Henrique Antunes de Souza - EMBRAPA Meio-Norte  
(Orientador)

**TERESINA-PI  
2025**

Com todo amor e carinho, ao meu esposo Nitalo, por seu apoio incondicional e compartilhar comigo esta jornada.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

À Deus, fonte inesgotável de força, por renovar minha perseverança e pela dádiva da vida.

À Universidade Federal do Piauí e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia pela oportunidade de aprimorar meus conhecimentos e alcançar mais uma qualificação profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudos, que permitiu a realização deste sonho.

À Empresa de Pesquisa Brasileira Agropecuária (Embrapa), pelo suporte técnico e financeiro (SEG: 20.22.03.036.00.00), que foram fundamentais para a concretização do projeto.

À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP/CT-AGRO/FNDCT) pelo apoio financeiro (convênio 01.22.0080.00, ref. 1219/21), imprescindível para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro (Processos: 443153/2023-0 e 313039/2023-2), importante para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha família, principalmente meu amado esposo Nitalo, meu pai Antônio, minha mãe Maria e meus irmãos Blênia e Flávio. O carinho e o apoio incondicional foram minha força durante momentos difíceis.

Ao orientador Dr. Henrique, exemplo de sabedoria, compromisso com a ciência, incentivo constante e ensinamentos fundamentais para o crescimento profissional e pessoal. Expresso minha gratidão e admiração.

Às coorientadoras Dra. Rosa e Dra. Mariléia, pela generosidade e contribuições enriquecedoras que foram essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Dr. Sagrilo e Dr. Oscar, exemplos de ética, profissionalismo e dedicação. Agradeço profundamente as colaborações em todas as etapas do desenvolvimento do trabalho.

Aos colaboradores da Embrapa Meio – Norte, principalmente Moreira, Afonso, Duarte, Vera e Maurício, pela paciência, ensinamentos e a partilha de tantas histórias.

Aos meus colegas de trabalho, Daiane, Rita, Paula, Maria Eduarda, Carlos Pedro, Edson e Samuel, por proporcionar leveza no trabalho árduo quando compartilhado com tanta alegria.

À Fazenda Barbosa, pelo suporte fornecido para a condução da pesquisa.

Meus sinceros agradecimentos a todos, que de alguma forma, contribuíram para a concretização desta conquista.

*Esta é minha ordem: Seja forte e corajoso!  
Não tenha medo nem desanime, pois o  
Senhor, seu Deus, estará com você por  
onde você andar.*

Josué 1:9

## RESUMO

A mais recente fronteira agrícola do Cerrado do Maranhão contribui para suprir a crescente demanda mundial por grãos de soja. Contudo, a redução dos impactos negativos sobre o ecossistema após a conversão da vegetação nativa em produção agrícola continua sendo o principal desafio para promover o desenvolvimento sustentável. Por isto, este estudo aborda técnicas conservacionistas para o cultivo da soja ao considerar as particularidades do bioma Cerrado do Maranhão. O objetivo posposto consistiu em: i) identificar culturas de cobertura e avaliar os seus efeitos na fertilidade do solo, nutrição e produtividade da soja em sucessão; ii) estabelecer a época adequada do corte do capim-sudão, como cultura de cobertura, que concilie melhorias da qualidade biológica do solo e aumento da produtividade da soja; iii) avaliar os efeitos de doses elevadas de calcário com gesso nas alterações das propriedades químicas do solo, nutrição e produtividade sob sistema de cultivo de soja/plantas de cobertura. Os estudos foram realizados em uma fazenda localizada no estado do Maranhão, Brasil. Os resíduos de culturas de cobertura promoveram melhorias da qualidade biológica do solo, mantendo a biomassa microbiana do solo ativa. A ciclagem de nutrientes promovida pelas culturas de cobertura contribuiu para a manutenção da qualidade química do solo e melhorias dos teores nutricionais da soja. O milheto, *Megathyrsus maximum* 'Tanzania', *M. maximum* 'Massai', feijão-caupi e *Crotalaria juncea* aumentaram a produtividade da soja em sucessão. O capim-sudão produziu elevada quantidade de biomassa (7,9 t ha<sup>-1</sup>) na entressafra. A produção de biomassa do capim-sudão não reduziu a produtividade da soja, permitindo manter a cobertura viva até sete dias antes da semeadura. Porém, o corte antecipado promoveu aumento no teor foliar de Cu, P e K na soja, enquanto ainda aumentou a eficiência na incorporação de carbono na biomassa microbiana. Doses elevadas de calcário, ou seja, doses acima da dose recomendada, aumentaram a quantidade de calcário reagido e apresentaram menor taxa de reação, por isto, melhoraram a qualidade química do solo e prolongaram o efeito residual. Doses elevadas de calcário aumentaram a fração P–Ca, mas não afetaram negativamente o teor de P. A aplicação de gesso aumentou a produtividade do milheto, mas não teve impacto significativo na produtividade da soja, embora tenha reduzido o teor foliar de K na soja. A aplicação de 6 t ha<sup>-1</sup> de calcário é recomendada por proporcionar maior produtividade acumulada da soja. Conclui-se que a adoção de culturas de cobertura e a correção adequada do solo são estratégias eficazes para viabilizar a intensificação sustentável da produção de soja no Cerrado do Maranhão.

**Palavras-chaves:** Agricultura conservacionista, calcário, ciclagem de nutrientes, fertilidade do solo, gesso agrícola.

## ABSTRACT

The newest agricultural frontier in the Cerrado biome of Maranhão contributes to meeting the growing global demand for soybeans. However, reducing the negative impacts on the ecosystem after the conversion of native vegetation to agricultural production remains the main challenge for promoting sustainable development. Therefore, this study addresses conservation techniques for soybean cultivation by considering the particularities of the Cerrado biome of Maranhão. The proposed objective was to: i) identify cover crops and evaluate their effects on soil fertility, nutrition and soybean productivity in succession; ii) establish the appropriate time for cutting Sudan grass as a cover crop, which combines improvements in soil biological quality and increased soybean productivity; iii) evaluate the effects of high doses of limestone with gypsum on changes in soil chemical properties, nutrition and productivity under a soybean/cover crop cultivation system. The studies were conducted on a farm located in the state of Maranhão, Brazil. Cover crop residues promoted improvements in soil biological quality, maintaining active soil microbial biomass. Nutrient cycling promoted by cover crops contributed to maintaining soil chemical quality and improving soybean nutritional content. Millet, *Megathyrsus maximum* 'Tanzania', *M. maximum* 'Massai', cowpea and *Crotalaria juncea* increased soybean productivity in succession. Sudan grass produced a high amount of biomass ( $7.9 \text{ t ha}^{-1}$ ) in the off-season. The biomass production of Sudan grass did not reduce soybean productivity, allowing the cover crop to be kept alive up to seven days before sowing. However, early cutting promoted an increase in the foliar content of Cu, P and K in soybean, while also increasing the efficiency of carbon incorporation into microbial biomass. High doses of limestone, i.e., doses above the recommended dose, increased the amount of reacted limestone and presented a lower reaction rate, therefore, improving soil chemical quality and prolonging the residual effect. High doses of limestone increased the P–Ca fraction, but did not negatively affect the P content. Gypsum application increased millet productivity, but had no significant impact on soybean productivity, although it reduced the foliar K content in soybean. The application of  $6 \text{ t ha}^{-1}$  of limestone is recommended because it provides greater accumulated soybean productivity. It is concluded that the adoption of cover crops and adequate soil correction are effective strategies to enable the sustainable intensification of soybean production in the Cerrado of Maranhão.

**Keywords:** Conservation agriculture, limestone, nutrient cycling, soil fertility, agricultural gypsum.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 Produção da soja na nova fronteira agrícola do Brasil .....	13
2.2 Plantas de cobertura em sistema de cultivo de soja .....	15
2.3 Seleção de plantas de cobertura de clima tropical para o Cerrado do Maranhão.....	17
2.4 Efeitos do calcário em sistema de cultivo de soja .....	20
2.5 Efeitos do gesso agrícola em sistema de cultivo de soja .....	22
REFERÊNCIAS.....	23
CAPÍTULO I – Culturas de cobertura otimizam a fertilidade do solo e a produtividade da soja no Cerrado do Nordeste brasileiro .....	36
Resumo.....	36
1 Introdução .....	38
2 Material e Métodos.....	39
2.1 Localização do experimento.....	39
2.2 Delineamento experimental.....	42
2.3 Condução e avaliação de culturas de cobertura .....	42
2.4 Condução e avaliação da soja .....	43
2.5 Análise estatística .....	44
3 Resultados .....	45
3.1 Biomassa e teor de nutrientes das culturas de cobertura .....	45
3.2 Produtividade e composição de sementes de soja .....	46
3.3 Propriedades biológicas do solo .....	47
3.4 Propriedades químicas do solo .....	48
3.5 Diagnóstico do estado nutricional da soja .....	49
4 Discussão.....	50
5 Conclusão .....	54
Referencias.....	55
CAPÍTULO II – Término antecipado do <i>sorghum sudanense</i> (piper) stapf. para cobertura de solo em sistema de cultivo de soja no MATOPIBA .....	62
Resumo.....	62
1 Introdução .....	64
2 Material e Métodos.....	65
2.1 Área experimental .....	65

2.2 Amostragem e avaliação das propriedades microbiológicas e químicas do solo .....	69
2.3 Amostragem e avaliação das propriedades microbiológicas e químicas do solo .....	69
2.4 Produtividade e teor de proteína nos grãos .....	70
2.5 Análise estatística .....	71
3 Resultados .....	71
3.1 Propriedades microbiológicas e químicas do solo .....	71
3.2 Estado nutricional da soja .....	74
3.3 Produtividade e teor de proteína nos grãos .....	75
4 Discussão.....	76
5 Conclusão .....	81
Referências.....	81
CAPÍTULO III – Recomendação de correção do solo em sistema de cultivo da soja em área de fronteira agrícola do Nordeste do Brasil .....	89
Resumo.....	89
1 Introdução .....	91
2 Material e Métodos.....	93
2.1 Local experimental .....	93
2.2 Projeto experimental .....	95
2.3 Manejo das culturas .....	95
2.4 Análise do estado nutricional .....	96
2.5 Análise química do solo .....	97
2.6 Análise de produtividade .....	98
2.7 Análise estatística .....	99
3 Resultados .....	99
3.1 Atributos químicos do solo .....	99
3.2 Concentração de Ca e Mg não trocáveis do solo.....	108
3.3 Fracionamento inorgânico do P no solo .....	109
3.4 Estado nutricional da soja .....	110
4.5 Produtividade das culturas.....	112
4 Discussão.....	114
5 Conclusão .....	119
Referências.....	120
APÊNDICE.....	128

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A expansão da produção de soja no Cerrado do Brasil consolida mundialmente o país como uma potência agrícola. Recentemente, a expansão e transformação do setor agrícola no Cerrado brasileiro ocorreu predominantemente na região estratégica denominada de MATOPIBA, que compreende os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e a Bahia. A conversão da vegetação nativa para a inserção da produção de soja no Maranhão ocorreu lentamente, mas atualmente, a soja é considerada a cultura de grãos mais explorada neste estado. A produção de soja no Maranhão contribui para suprir a crescente demanda por grãos e, conseqüentemente, auxiliar no alcance da segurança alimentar global. Contudo, a conversão do ecossistema natural para áreas agrícolas implica em buscar sistemas de produção conservacionistas que conciliem a redução dos impactos negativos do uso da terra com a intensificação sustentável da produção agrícola.

Pensando nisto, este estudo dividido em três capítulos, aborda técnicas conservacionistas para o cultivo da soja considerando as particularidades de uma nova área de fronteira agrícola do bioma Cerrado. No Cerrado do Maranhão, o regime hídrico deficitário na entressafra limita o cultivo de culturas de cobertura ou, quando alguma cultura de cobertura é implantada, se restringe apenas ao cultivo do milheto, uma cultura tolerante ao déficit hídrico. Neste contexto, a proposta com o primeiro capítulo consiste em identificar potenciais culturas de cobertura para o cultivo na entressafra da soja nas condições do Cerrado do Maranhão. Além disso, consiste em compreender os benefícios e as limitações das potenciais culturas de cobertura sobre a atividade microbiológica do solo, a manutenção ou melhorias na fertilidade do solo, assim como os efeitos na ciclagem de nutrientes e, se isto pode resultar em acréscimo na produtividade da soja em sucessão.

Uma cultura de cobertura promissora em sistema de produção de soja no Cerrado do Maranhão é o capim-sudão (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf.). Apesar da condição hídrica deficitária na entressafra, o capim-sudão destaca-se pela alta produção de biomassa, garantindo cobertura prolongada do solo, especialmente com término tardio. Contudo, há a preocupação iminente de que o corte tardio da cultura de cobertura possa causar competição entre a cultura

de cobertura e a cultura principal, com conseqüente efeito deletério na produtividade da soja. O corte antecipado parece uma estratégia viável ao permitir que os nutrientes acumulados pela cultura de cobertura sejam liberados em tempo hábil para a cultura principal em sucessão. Desta forma, em um esforço para buscar uma estratégia que fortaleça os benefícios do uso do capim-sudão, o estudo proposto no segundo capítulo consiste em ajustar o período adequado do corte do capim-sudão que concilie cobertura adequada do solo na entressafra para promover a manutenção ou melhorias na qualidade do solo e, sem que isto afete a eficiência da ciclagem de nutrientes e redução da produtividade da soja.

No Cerrado do Maranhão, a baixa fertilidade natural do solo constitui um entrave para alcançar altos patamares produtivos da soja em áreas que estão sendo recentemente convertida para a produção agrícola. Neste contexto, o calcário é amplamente difundido para corrigir a acidez do solo e auxiliar na construção da fertilidade do solo. Contudo, a aplicação do calcário ocorre em concomitância ao início do período do chuvoso, que também coincide com a semeadura da soja na região. Desta forma, as condições climáticas e o tempo após a aplicação do calcário podem ser considerados fatores limitantes quanto à eficiência da dose convencional do calcário e seus efeitos na correção da acidez do solo. Além disso, a baixa solubilidade do calcário pode restringir a correção da acidez apenas à camada superficial, o que pode limitar o crescimento das raízes, prejudicar absorção de água e nutrientes, assim como causar o declínio na produtividade da soja, principalmente quando submetido ocasionalmente a período de deficiência hídrica. O terceiro capítulo aborda o efeito de doses elevadas de calcário associado com o gesso agrícola na dinâmica das mudanças das propriedades químicas do perfil do solo, nutrição e produtividade das culturas em sistema de produção de soja em uma área recém-convertida para a produção agrícola.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Produção da soja na última fronteira agrícola do Brasil

A transformação do setor agrícola brasileiro aliado à extensão territorial e às condições de clima e a disponibilidade de água consolidou o país como um dos principais exportadores de commodities agrícolas (Mueller; Mueller, 2016), principalmente a soja, devido à alta demanda global pelo consumo de óleo e proteína animal (Brown *et al.*, 2005). A soja foi introduzida no Brasil em 1882, mas somente na década de 1940 passou progressivamente da produção de biomassa para a produção de grãos na região Sul do país. Após isso, expandiu-se para o Centro-Oeste (bioma Cerrado) na década de 1980, devido ao desenvolvimento de cultivares bem adaptadas à baixa latitude da região. Finalmente, na década de 2000, sua produção se expandiu para regiões do Cerrado localizadas mais para o norte do país (latitudes próximas a 0°) (Cattelan; Dall'Agnol, 2018).

O avanço da soja para áreas antes consideradas inadequadas foi crucial para que o Brasil alcançasse a primeira posição mundial na produção de soja, correspondendo a 39% (Usda, 2023), com uma produção de 147 milhões de toneladas em uma área de 46 milhões de hectares na safra agrícola 2023/24 (Conab, 2024). No entanto, a posição ocupada pelo Brasil como maior produtor de soja só foi alcançada recentemente devido à contribuição da expansão do cultivo da soja em uma última área de fronteira agrícola do bioma Cerrado, denominada de MATOPIBA (Araújo *et al.*, 2019; Araújo *et al.*, 2024).

A última fronteira agrícola brasileira denominada de MATOPIBA abrange uma área total de 73.173.485 hectares que compreende os estados do Maranhão (33%), Tocantins (38%), Piauí (11%) e a Bahia (18%), reunindo assim 31 microrregiões, compostas por 337 municípios (Miranda *et al.*, 2014). Um dos critérios utilizados na delimitação territorial do MATOPIBA foi as áreas de Cerrados nos estados, que totalizam 91% do território do MATOPIBA. Contudo, áreas remanescentes do bioma Amazônia (~7,0%) e Caatinga (~2,0%) também foram incluídas na delimitação proposta (Magalhães e Miranda, 2014). Nesta região, há a predominância da classe de solo Latossolo (38%), especificamente Latossolo amarelo (31%), mas também há pequenas frações de Neossolo (25%)

como segunda maior classe de solos encontrada, seguido de Plintossolo (19%) (Magalhães; Miranda, 2014; Reis *et al.*, 2020). A região do MATOPIBA apresenta estações chuvosa (entre outubro e abril) e seca (entre maio a setembro) bem definidas, com precipitação pluviométrica média anual de 1502,75 mm e temperatura do ar de 26,28 °C (Aparecido *et al.*, 2023).

O desenvolvimento do MATOPIBA como fronteira agrícola ocorreu desde o início dos anos 2000, mas a partir de 2015 houve o apoio de políticas agrícolas, incluindo principalmente o Decreto Brasileiro n.º 8447, que comprometeu oficialmente apoiar governamentalmente o desenvolvimento da região (Spera *et al.*, 2016). Além disso, os baixos preços da terra, a topografia apropriada para a agricultura mecanizada, as propriedades físicas do solo favoráveis e a disponibilidade de água suficiente durante o ciclo da soja são fatores que permitiram a expansão da soja na região (Pires *et al.*, 2016, Araújo *et al.*, 2019).

No entanto, este avanço começou vagarosamente. Em 1985, a área com cultivo de soja no MATOPIBA totalizava aproximadamente 4200 hectares, sendo que no ano 2000 a área com cultivo de soja atingiu 500.000 hectares (Araújo *et al.*, 2024). A partir disto, houve uma expansão acelerada do cultivo da soja na área do MATOPIBA, que supera 5,5 milhões de hectares na safra agrícola 2023/24, representando 59% da área destinada ao cultivo de grãos (Conab, 2024). Atualmente, o MATOPIBA contribui com aproximadamente 20 milhões de toneladas de grãos de soja, sendo que os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia colaboram com aproximadamente 21,7, 22,5, 18,9 e 36,8% da produção de soja da região, com produtividade média de 3.443 kg ha<sup>-1</sup> (Conab, 2024).

A soja é a cultura de grãos mais explorada no Maranhão. Todavia, o cultivo desta cultura no estado iniciou na década de 1980 com apenas 80 hectares de soja (Ibge, 2022). Esta realidade contrasta com a safra agrícola atual (2023/24), cuja área cultivada com soja no estado ultrapassa 1,3 milhões de hectares, com produção de 4,4 milhões de toneladas de grãos e produtividade média de 3.312 kg ha<sup>-1</sup> (Conab, 2024). No Maranhão, a produção de soja se difunde em cinco mesorregiões (Norte, Leste, Centro, Oeste e Sul), sendo que o Sul maranhense é uma das mesorregiões mais produtivas do MATOPIBA (Santos *et al.*, 2019), contribuindo com aproximadamente 75% da área colhida no estado (Ibge, 2022). Isto ocorre porque a expansão do cultivo da soja iniciou-se no Sul do estado do Maranhão.

No entanto, este cenário está sendo alterado desde o ano 2000, devido a expansão da soja para as demais mesorregiões, sendo que dos 217 municípios maranhense, 135 constituem a nova fronteira agrícola (Feitosa *et al.*, 2023). Os cinco municípios maranhenses que mais produzem soja são, em ordem decrescente: Tasso Fragoso (640.548 t), Balsas (599.350 t), Açailândia (245.637 t), Alto Parnaíba (192.060 t) e Riachão (168.987 t) (Ibge, 2022). Estima-se que haverá ainda uma perda decenal de 40.000 km<sup>2</sup> de vegetação remanescente do Cerrado até 2050 em comparação com 2002, sendo que somente no Maranhão esta perda corresponderá a 13%, indicando uma expansão da fronteira agrícola ainda maior no estado (Ferreira *et al.*, 2013).

## **2.2 Plantas de cobertura em sistema de cultivo de soja**

A agricultura desempenha função primordial; produzir alimentos de alta qualidade e em quantidade suficiente enquanto reduz os impactos negativos ambientais (Wittwer *et al.*, 2017). No entanto, devido à expansão da soja em larga escala, é indispensável desenvolver práticas de manejo que melhorem a qualidade do solo para garantir sua sustentabilidade (Pires *et al.*, 2020). Diante deste contexto, o uso de cobertura vegetal constitui um princípio da agricultura conservacionista que envolve o plantio de culturas não comerciais para fornecer cobertura do solo entre as estações de cultivo (Deines *et al.*, 2022), ocasionando um aumento no interesse do uso de culturas de cobertura nas últimas décadas (Ruis *et al.*, 2019).

Em sistema de cultivo de soja, a incorporação de culturas de cobertura estimula a atividade enzimática do solo produzidas por fungos e bactérias em resposta aos compostos exsudatos de raízes, aumenta o aporte de biomassa acima do solo e a entrada de nutrientes através de substratos das culturas de cobertura (Tyler, 2020). Uma contribuição importante das plantas de cobertura também se baseia no aumento da concentração de carbono orgânico do solo atribuído à maior quantidade de carbono retornado ao solo pelas raízes da planta em detrimento ao monocultivo da soja (Abdalla *et al.*, 2019; Duval *et al.*, 2016; Boselli *et al.*, 2020). O carbono fornecido pelas culturas de cobertura é uma importante fonte de energia aos microrganismos do solo (Pokhrel *et al.*, 2021) e, por isto, estimula a atividade e a biomassa microbiana (Turmel *et al.*, 2015;

Strickland *et al.*, 2019), alterando a dinâmica do carbono no solo (Singh; Kumar, 2020).

Um outro aspecto interessante aborda a influência das culturas de cobertura na ciclagem de nutrientes, pois estas aumentam a disponibilidade de nutrientes em sistema de cultivo de soja, devido à capacidade exploratória da raiz no perfil do solo, mineralização dos nutrientes reciclados a partir dos resíduos das culturas de cobertura em decomposição e mobilização de formas insolúveis dos nutrientes para formas solúveis (Harasim *et al.*, 2015; Tiecher *et al.*, 2017; Haruna; Nkongolo, 2020; Beltrán *et al.*, 2021; Rodrigues *et al.*, 2021; Wulanningtyas *et al.*, 2021). A inclusão de culturas de cobertura permite o uso mais eficiente de nutrientes, resultado em melhor balanço destes nutrientes em sistema de cultivo com soja (White *et al.*, 2021). Para isto, é necessário que a quantidade e a liberação de nutrientes pelos resíduos da biomassa coincidam com o período de maior demanda da cultura (Silva *et al.*, 2024).

Os benefícios das culturas de cobertura na qualidade do solo resultam no aumento de produtividade de grãos de soja (Kirkpatrick *et al.*, 2023). Alguns estudos demonstram que os efeitos das culturas de coberturas são proeminentes sob condições climáticas adversas. Estudos mostram que, o déficit hídrico imposto no período de formação das vagens e enchimento dos grãos da soja não afetou drasticamente o rendimento desta oleaginosa, devido à produção de palhada advindos da cultura de cobertura (Tanaka *et al.*, 2019; Balbinot-Júnior *et al.* (2024). Há estudos, no entanto, que relatam que as culturas de coberturas não foram capazes de afetar a produtividade da soja pois seus efeitos são mais complexos (Nascente; Sonte, 2018; Pokhrel *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2023). Também há estudo que relata que produtividade da soja pode ser negativamente afetada em reposta à alta relação entre carbono e nitrogênio (C/N) da cultura de cobertura, que favorece a imobilização temporária de nitrogênio, necessário para a soja no período inicial (Singh *et al.*, 2020).

A inclusão de plantas de cobertura reduz o período de pousio e aumenta a diversidade e multifuncionalidade dos sistemas agrícolas (Acharya *et al.*, 2019), pois além de fornecer cobertura do solo, as culturas de cobertura fornecem serviços ecossistêmicos adicionais (Abdalla *et al.*, 2019). Desta forma, as culturas de cobertura podem ser utilizadas para atingir objetivos específicos (Koudahe *et al.*, 2022). Apesar das vantagens, ainda há uma certa resistência

dos agricultores quanto ao uso das culturas de cobertura, principalmente devido aos custos adicionais e requisitos de mão de obra (Wittwer *et al.*, 2017). Isto reforça a urgência de estudos que orientem o manejo das culturas de cobertura para maximizar os benefícios proporcionados nos impactos às culturas comerciais em diferentes solos, condições climáticas e práticas de manejo (Qin *et al.*, 2021).

### **2.3 Seleção de plantas de cobertura de clima tropical para o Cerrado do Maranhão**

Os potenciais benefícios das culturas de cobertura exigem uma melhor compreensão em diferentes regiões e cenários de manejo (Ruis *et al.*, 2019), sendo ainda, imprescindível identificar as melhores combinações de culturas de cobertura/ comerciais para manter ou elevar os rendimentos da cultura comercial em relação às condições locais (Vincent-Caboud *et al.*, 2019; Qin *et al.*, 2021). No Leste do Maranhão, ainda é bastante comum o plantio do milheto (*Pennisetum glaucum L.*) após a colheita da soja, seja para palhada ou para a produção de grãos (Brito *et al.*, 2023; Almeida *et al.*, 2024). O milheto é uma opção viável como cultura de cobertura em cultivo de soja, porque sua alta produção de biomassa favorece o carbono da biomassa microbiana (Pires *et al.*, 2020), a labilidade do P (Leite *et al.*, 2024), o aumento da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , assim como o aumento da produtividade da soja em comparação ao pousio (Rebonatti *et al.*, 2023). Isso ocorre porque o milheto tem uma degradação mais rápida, reduzindo a probabilidade de competir por recursos com a cultura principal (Nascente *et al.*, 2013).

Semelhante ao milheto, o capim-sudão [*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf.] é uma importante cultura forrageira, adequada para o cultivo em condições climáticas quentes e recursos hídricos limitados (Al-Solaimani *et al.*, 2017). Inclusive, sob condição hídrica deficitária, o capim-sudão apresenta maior produtividade de massa seca do que o milheto, pois é menos sensível à escassez de água (Ismail *et al.*, 2017). Devido à grande capacidade de produção de massa seca (Stybayev *et al.*, 2023), o capim-sudão demonstrou capacidade de aumentar o carbono orgânico do solo em comparação ao pousio na entressafra da cultura anual (Yang *et al.*, 2024), assim como apresenta vantagem

competitiva em solo com limitação de nutrientes, como o  $K^+$ , ao mobilizar forma não trocável para a forma trocável deste íon (Basak *et al.*, 2009). No entanto, pesquisas que envolvem o uso do capim-sudão como cultura de cobertura são limitadas, sendo que os estudos sobre essa cultura se concentram apenas na produtividade e qualidade da forragem (Ziki *et al.*, 2019; Raj *et al.*, 2021; Hassan *et al.*, 2022).

O gênero *Megathyrsus*, especialmente *Megathyrsus maximum* cv. Tanzânia e *Megathyrsus maximum* cv. Massai também se destacam neste contexto como cultura de cobertura, pois apresentam produção de biomassa em alta quantidade e qualidade, incluindo alta relação C/N e acúmulo de nutrientes, passíveis de mineralização e posterior absorção pela cultura subsequente (Bublitz *et al.*, 2024). O *M. maximum* cv. Tanzânia possui grande capacidade de converter nutrientes residuais no solo em biomassa, com posterior efeito positivo na fertilidade do solo, como  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e saturação por bases (Costa *et al.*, 2020), além de favorecer o aumento do teor de nutrientes e produtividade de grãos da soja (Costa *et al.*, 2021). Embora apresente potencial como cultura de cobertura, o *M. maximum* cv. Massai tem sido estudado essencialmente para produção de forragem e pastejo de animais (Simeão *et al.*, 2021; Cunha *et al.*, 2022). Resultados sobre os efeitos desta gramínea como culturas de cobertura são incipientes.

O gênero *Urochloa* também é uma opção viável como planta de cobertura, pois em sistema de cultivo de soja, a *U. brizantha* cv. Marandu e *U. Ruziziensis* cv. Ruziziensis proporcionaram concentrações de nutrientes dentro ou perto das faixas adequadas para a produção da soja, sendo que a quantidade de palhada fornecida por essas culturas ainda favoreceu o estabelecimento da soja em condições adversas durante o estágio crítico de desenvolvimento (Tanaka *et al.*, 2019). A quantidade de palhada dessas gramíneas contribui para o aporte de carbono do solo (Merloti *et al.*, 2023). A produção de biomassa pela *U. brizantha* cv. Marandu também reflete em acúmulo de nutrientes (Crusciol *et al.*, 2015), com efeitos positivos na fertilidade do solo (Costa *et al.*, 2021; Crusciol *et al.*, 2023), sobretudo, no aumento da labilidade do P e produtividade de grãos (Crusciol *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2018). O *U. Ruziziensis* cv. Ruziziensis é reconhecido por reciclar o P do solo, inclusive por acessar P não lábil e aumentar o reservatório de P lábil do solo (Merlin *et al.*, 2016; Rodrigues *et al.*, 2021),

devido os sistemas radiculares vigorosos e densos, que permitem explorar um maior volume de solo (Rosolem *et al.*, 2017).

As leguminosas tropicais também constituem uma alternativa promissora como culturas de cobertura em sistema de cultivo no Cerrado. As principais vantagens das leguminosas são relacionadas à quantidade de nitrogênio disponibilizada às plantas devido à simbiose com as bactérias do solo (rizóbios), a alta qualidade da matéria orgânica em termos de relação C/N que favorece a mineralização de nutrientes, além de possuírem sistemas radiculares que favorecem a ciclagem de nutrientes (Stagnari *et al.*, 2017; Jensen *et al.*, 2020). A *Crotalaria juncea* e o feijão guandu (*Cajanus cajan*) são leguminosas tropicais que contribuem com uma considerável produção de biomassa (Berriel; Perdomo, 2023), sendo excelentes fornecedoras de nutrientes ao solo pois acumulam grande quantidade na parte aérea (Pissinati *et al.*, 2018). O feijão guandu, em específico, proporciona aumento do carbono orgânico do solo em comparação ao pousio (Sousa *et al.*, 2017) e aumenta a disponibilidade de P por possuir a capacidade de mineralização de P a partir de reservatórios orgânico (Garland *et al.*, 2017). Ainda, seu uso proporciona bons rendimentos da soja em sucessão (Rebonatti *et al.*, 2023). Já a *C. juncea* é uma importante cultura para promover o sequestro de carbono no solo como consequência da grande produção de biomassa (Atakoun *et al.*, 2023). Essa cultura ainda apresenta alta tolerância à seca, pois mesmo sob déficit hídrico, a produção de biomassa e fixação biológica de nitrogênio não são afetados (Berriel *et al.*, 2020).

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) é outra leguminosa tropical que também apresenta tolerância ao déficit hídrico e a altas temperaturas (Harrison *et al.*, 2006), sendo, portanto, indicada para o período de entressafra da soja nas condições tropicais do Cerrado. Além da tolerância aos estresses abióticos (Baligar; Fageria, 2007), o feijão-caupi é uma excelente cultura de cobertura, pois se desenvolve bem em solos de baixa fertilidade, profundos e arenosos, enquanto produz biomassa e realiza a fixação biológica de nitrogênio (Harrison *et al.*, 2006; Aiosa *et al.*, 2020). Como o feijão-caupi possui ciclo fenológico curto e produz grãos rapidamente, aproximadamente em 60 dias (Pacheco *et al.*, 2017; Aiosa *et al.*, 2020), o cultivo desta leguminosa ocorre após a soja como uma segunda safra ou “safrinha” (Pires *et al.*, 2018; Leite *et al.*,

2020; Almeida *et al.*, 2024). Porém, seus efeitos como cultura de cobertura em sistema de cultivo de soja ainda não foram elucidados.

## 2.4 Efeitos do calcário em sistema de cultivo de soja

O solo fértil é um dos principais requisitos para alcançar a segurança alimentar e a sustentabilidade agrícola (Holanda *et al.*, 2018). Contudo, a fertilidade do solo é limitada em ambientes tropicais, cujo solos são intemperizados e constituídos basicamente por minerais do tipo 1:1, como a caulinita ou sesquióxidos (Inagaki *et al.*, 2017; Deus *et al.*, 2020). Neste tipo de solo, a acidez é um entrave ao rendimento das culturas (Cairos *et al.*, 2015), porque colabora com efeito cascata em vários atributos do solo (Nyamaizi *et al.*, 2022). O processo de acidificação do solo substitui cátions básicos, como  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{K}^{+}$  por íons  $\text{H}^{+}$  e  $\text{Al}^{3+}$ , aumenta a sorção do P e limita o crescimento das raízes, com impacto na absorção de água e nutrientes (Agegnehu *et al.*, 2021). Neste contexto, a correção da acidez do solo é comumente realizada pela aplicação do calcário (Delfim *et al.*, 2024).

A prática de aplicação de calcário corrige a acidez pois eleva o pH do solo (Crusciol *et al.*, 2016). O carbonato de cálcio ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) adicionado através do calcário é hidrolisado, formando o íon hidróxido ( $\text{OH}^{-}$ ) que aumenta o pH da solução do solo (Antoniadis *et al.*, 2015). Os cátions  $\text{Ca}^{2+}$  e/ou  $\text{Mg}^{2+}$  fornecidos pelo calcário também deslocam o  $\text{H}^{+}$  na solução do solo, conduzindo ao aumento do pH (Holanda *et al.*, 2018). Em paralelo com o aumento do pH, há a diminuição da disponibilidade de  $\text{Al}^{3+}$  no solo, devido à formação do precipitado  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , formado a partir das reações entre hidroxilas ( $\text{HO}^{-}$ ) e bicarbonato ( $\text{HCO}_3^{-}$ ) na solução do solo após a dissolução do calcário (Besen *et al.*, 2021). Com a redução da disponibilidade do  $\text{Al}^{3+}$ , há aumento da saturação por bases, principalmente por  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  (Fontoura *et al.*, 2019; Minato *et al.*, 2023). Em solo ácidos e intemperizados é comum encontrar uma menor disponibilidade de P atribuído à precipitação deste nutriente como fosfato de Al (P-Al) e Fe (P-Fe) e em óxidos insolúveis de Al e Fe, como  $\text{Al}(\text{OH})_3$  e  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (Mkhonza *et al.*, 2020). Com o aumento do pH, os íons  $\text{OH}^{-}$  em solução competem com o ânion fosfato e promovem a precipitação de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  (Costa; Crusciol, 2016). Por

isso, o calcário promove benefício quanto ao aumento da disponibilidade de P para as plantas (Kiflu *et al.*, 2017).

Contudo, com o aporte de calcário, o P pode diminuir devido à formação de compostos insolúveis de P–Ca (Azeez *et al.*, 2020; Fan *et al.*, 2020). Outro fator relevante é que o aporte do calcário também pode diminuir a disponibilidade dos micronutrientes catiônicos do solo, como  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Cu}^{2+}$  (Valentinuzzi *et al.*, 2015; Auler *et al.*, 2019; Bossolani *et al.*, 2022). Dentre esses, o  $\text{Fe}^{2+}$  é mais sensível ao aumento do pH do que os outros micronutrientes catiônicos (Moreira *et al.*, 2024). O fornecimento de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  pelo calcário também pode afetar a retenção de outros cátions no solo, como  $\text{K}^+$ , sendo este mais facilmente lixiviado para camadas mais profundas em decorrência da entrada e preferência de adsorção por cátions com maior valência (Costa *et al.*, 2023). Por estes motivos, ainda há necessidade de ajustar as recomendações de calcário que compreenda a dinâmica das reações do calcário em solos tropicais sob sistemas de produção mais intensivos (Santos *et al.*, 2024).

As mudanças obtidas após o aporte do calcário no solo provocam alterações nutricionais da soja, como aumento da concentração foliar de P, K, Ca e Mg (Bossolani *et al.*, 2021). O aumento da concentração de P foliar na soja pode ocorrer por dois motivos, seja pelo acesso à forma mais solúvel de P após a dessorção ou pelo aumento da capacidade de exploração das raízes da soja em um maior volume de solo devido à menor acidez (Joris *et al.*, 2013). Costa *et al.* (2023) verificaram que na ausência do aporte do calcário, a baixa concentração de cátions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ ), assim como alta concentração de  $\text{Al}^{3+}$  limitou a produtividade da soja, diferente do resultado obtido após a aplicação do calcário que culminou em melhorias na nutrição da soja e aumento de produtividade. A presença do  $\text{Al}^{3+}$  dificulta o crescimento e desenvolvimento de raízes de soja em profundidade no perfil do solo (Bortoluzzi *et al.*, 2014). Assim, melhorar os atributos químicos em todo o perfil do solo após o aporte de calcário pode melhorar o desenvolvimento e a distribuição das raízes em camadas mais profundas do solo, com benefícios no acúmulo de matéria seca (Bossolani *et al.*, 2022). Contudo, sob condições de alta fertilidade do solo, a influência do calcário pouco influencia na produtividade da soja (Minato *et al.*, 2023).

## 2.5 Efeitos do gesso agrícola em sistema de cultivo de soja

O calcário, embora seja um importante corretivo do solo, apresenta lento tempo de reação, pois é relativamente insolúvel e imóvel no solo, portanto, desfavorecendo a correção da acidez no perfil do solo (Bossolani *et al.*, 2021). Além disso, os ânions  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{OH}^-$ , originados da dissolução do calcário reagem neutralizando a acidez na camada superficial do solo, enquanto que em subsuperfície ainda permanece níveis tóxicos de  $\text{Al}^{3+}$  (Caires *et al.*, 2005). Diante disto, surge o gesso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), embora mais solúvel, não é um corretivo da acidez do solo, pois não pode consumir  $\text{H}^+$  ou produzir  $\text{OH}^-$  (Borgmann *et al.*, 2021; Minato *et al.*, 2023)

O gesso diminui a disponibilidade do  $\text{Al}^{3+}$  tóxico em subsuperfície devido à formação do par iônico  $\text{AlSO}_4^0$ , enquanto aumenta a saturação por  $\text{Ca}^{2+}$  ao longo do perfil do solo ((Inagaki *et al.*, 2017; Nora *et al.*, 2017b). Além do  $\text{Ca}^{2+}$ , o gesso também é uma fonte importante de  $\text{SO}_4^{2-}$  (Brignoli *et al.*, 2021; Brignoli *et al.*, 2022). Porém, a dose adequada é um aspecto importante, pois o excesso de gesso pode inibir a absorção dos cátions  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  pela planta devido à maior proporção de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo fornecido pelo gesso (Schenfert *et al.*, 2019). Outro fator é que, o  $\text{S-SO}_4^{2-}$  parcialmente hidrolisado é altamente móvel no solo e pode facilmente se ligar a cátions acompanhantes, como  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  trocáveis, formando pares de íons solúveis com menor valência ou carga neutra, facilmente lixiviados para camadas além da zona de absorção radicular (Costa e Crusciol, 2016; Fontoura *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2023).

Alguns autores relatam a ausência de resposta da produtividade da soja ao gesso (Cairos *et al.*, 2010; Alves *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2024). Porém, efeitos benéficos do gesso no cultivo da soja são mais proeminentes durante o período de déficit hídrico. Houve efeito na produtividade da soja pela aplicação de gesso quando a saturação por  $\text{Al}^{3+}$  foi superior a 10% e/ou quando o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  foi inferior a  $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (0,20–0,40 m) na presença de deficiência hídrica (Pias *et al.*, 2020). Mas na ausência de deficiência hídrica, houve efeito do gesso na produtividade da soja somente quando a saturação por  $\text{Al}^{3+}$  superou o limite de 40% (0,20–0,40 m) (Pias *et al.*, 2020). A redução da atividade do  $\text{Al}^{3+}$  tóxico com a aplicação do gesso durante o período de seca permite à soja desenvolver

mecanismo de resistência a seca como o desenvolvimento do sistema radicular, amenizando os efeitos deletérios do estresse hídrico (Nora *et al.*, 2017a).

## REFERÊNCIAS

- ABDALLA, M.; HASTINGS, A.; CHENG, K.; YUE, Q.; CHADWICK, D.; ESPENBERG, M.; TRUU, J.; REES, R. M.; SMITH, P. A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. **Global Change Biology**, v. 25, n. 8, p. 2530-2543, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14644>.
- ACHARYA, B. S.; DODLA, S.; GASTON, L. A.; DARAPUNENI, M.; WANG, J. J.; SEPAT, S.; BOHARA, H. Winter cover crops effect on soil moisture and soybean growth and yield under different tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104430, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104430>.
- AGEGNEHU, G.; AMEDE, T.; ERKOSSA, T.; YIRGA, C.; HENRY, C.; TYLER, R.; NOSWORTHY, M. G.; BEYENE, S.; SILESHI, G. W. Extent and management of acid soils for sustainable crop production system in the tropical agroecosystems: a review. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science**, v. 71, n. 9, p. 852-869, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1954239>.
- AIOSA, M. L.; NEELY, C. B.; MORGAN, C. L.; JESSUP, R. W.; CORRIHER-OLSON, V. A.; SOMENAHALLY, A. C.; NORMAN, K. D.; SMITH, G. R.; ROUQUETTE JÚNIOR, F. M. Cowpeas as a summer cover crop for forage rye. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 3, n. 1, p. e20057, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agg2.20057>.
- ALMEIDA, R. E. M.; SOUZA, H. A.; EVANGELISTA, B. A.; UHLMANN, A.; RAMOS, M. R.; SAGRILO, E.; DIAS, T. S. S.; OLIVEIRA, L. R. S. P.; COSTA, N. R. Challenges to Managing Soil Health in the Newest Agricultural Frontier in Brazil. *In*: MENDES, I. C.; CHERUBIN, M. R. (Org.). **Soil Health Series: Volume 3 Soil Health and Sustainable Agriculture in Brazil**. Wiley, 2024. p. 327-374. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780891187448.ch11>.
- AL-SOLAIMANI, S. G.; ALGHABARI, F.; IHSAN, M. Z.; FAHAD, S. Water deficit irrigation and nitrogen response of Sudan grass under arid land drip irrigation conditions. **Irrigation and Drainage**, v. 66, n. 3, p. 365-376, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/ird.2110>.
- ALVES, L. A.; TIECHER, T. L.; FLORES, J. P. M.; FILIPPI, D.; GATIBONI, L. C.; BAYER, C.; PIAS, O. H. C.; MARQUEZ, A. A.; BORDIGNON, V.; GOULART, R. Z.; TIECHER, T. Soil chemical properties and crop response to gypsum and limestone on a coarse-textured Ultisol under no-till in the Brazilian Pampa biome. **Geoderma Regional**, v. 25, p. e00372, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00372>

- ANTONIADIS, V.; HATZIS, F.; BACHTSEVANIDIS, D.; KOUTROUBAS, S. D. Phosphorus availability in low-P and acidic soils as affected by liming and P addition. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 46, n. 10, p. 1288-1298, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1033539>
- APARECIDO, L. E. O.; DUTRA, A. F.; LORENÇONE, P. A.; ALCÂNTARA NETO, F.; LORENÇONE, J. A.; LEITE, M. R. L. Climate change in MATOPIBA region of Brazil: a study on climate extremes in agriculture. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 153, n. 1, p. 87-100, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04509-x>.
- ARAÚJO, M. L. S. D.; RUFINO, I. A. A.; SILVA, F. B.; BRITO, H. C. D.; SANTOS, J. R. N. The Relationship between Climate, Agriculture and Land Cover in Matopiba, Brazil (1985–2020). **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 2670, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16072670>.
- ARAÚJO, M. L. S.; SANO, E. E.; BOLFE, É. L.; SANTOS, J. R. N.; SANTOS, J. S.; SILVA, F. B. Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990–2015). **Land Use Policy**, v. 80, p. 57-67, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.040>.
- ATAKOUN, A. M.; TOVIHOUDJI, P. G.; DIOGO, R. V.; YEMADJE, P. L.; BALARABE, O.; AKPONIKPÈ, P. I.; SEKLOKA, E.; HOUGNI, A.; TITTONELL P. Evaluation of cover crop contributions to conservation agriculture in northern Benin. **Field Crops Research**, v. 303, p. 109118, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109118>.
- AULER, A. C.; CAIRES, E. F.; PIRES, L. F.; GALETTO, S. L.; ROMANIW, J.; CHARNOBAY, A. C. Lime effects in a no-tillage system on Inceptisols in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 16, p. e00206, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00206>.
- AZEEZ, M. O.; CHRISTENSEN, J. T.; RAVNSKOV, S.; HECKRATH, G. J.; LABOURIAU, R.; CHRISTENSEN, B. T.; RUBÆK, G. H. Phosphorus in an arable coarse sandy soil profile after 74 years with different lime and P fertilizer applications. **Geoderma**, v. 376, p. 114555, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114555>.
- BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; OLIVEIRA, M. A.; COELHO, A. E.; MORAES, M. T. Soybean yield, seed protein and oil concentration, and soil fertility affected by off-season crops. **European Journal of Agronomy**, v. 153, p. 127039, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127039>.
- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K. Agronomy and physiology of tropical cover crops. **Journal of Plant Nutrition**, v. 30, n. 8, p. 1287-1339, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904160701554997>.
- BASAK, B. B.; BISWAS, D. R. Influence of potassium solubilizing microorganism (*Bacillus mucilaginosus*) and waste mica on potassium uptake dynamics by sudan grass (*Sorghum vulgare* Pers.) grown under two Alfisols. **Plant and Soil**, v. 317, p. 235-255, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9805-z>.

BELTRÁN, M.; GALANTINI, J. A.; SALVAGIOTTI, F.; TOGNETTI, P.; BACIGALUPPO, S.; ROZAS, H. R. S.; BARRACO, M.; BARBIERI, P. A. Do soil carbon sequestration and soil fertility increase by including a gramineous cover crop in continuous soybean?. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, n. 5, p. 1380-1394, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20257>.

BERRIEL, V.; PERDOMO, C. H. *Cajanus cajan*: a promissory high-nitrogen fixing cover crop for Uruguay. **Frontiers in Agronomy**, v. 5, p. 1214811, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1214811>.

BERRIEL, V.; PERDOMO, C.; MONZA, J. Carbon isotope discrimination and water-use efficiency in crotalaria cover crops under moderate water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 537-545, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00142-8>.

BESEN, M. R.; RIBEIRO, R. H.; ESPER NETO, M.; MINATO, E. A.; CONEGLIAN, C. F.; KACHINSKI, W. D.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Lime and phosphogypsum application management: changes in soil acidity, sulfur availability and crop yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. e0200135, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200135>

BORGMANN, C.; SECCO, D.; MARINS, A. C.; ZANAO JUNIOR, L. A.; BASSEGIO, D.; SOUZA, S. N. M. D.; ZANG, F. N.; SILVA, T. R. B. D. Effect of soil compaction and application of lime and gypsum on soil properties and yield of soybean. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, n. 12, p. 1434-1447, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1885688>.

BORTOLUZZI, E. C.; PARIZE, G. L.; KORCHAGIN, J.; SILVA, V. R. D.; RHEINHEIMER, D. D. S.; KAMINSKI, J. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 262-271, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100026>.

BOSELLI, R.; FIORINI, A.; SANTELLI, S.; ARDENTI, F.; CAPRA, F.; MARIS, S. C.; TABAGLIO, V. Cover crops during transition to no-till maintain yield and enhance soil fertility in intensive agro-ecosystems. **Field Crops Research**, v. 255, p. 107871, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107871>.

BOSSOLANI, J. W.; CRUSCIOL, C. A. C.; MORETTI, L. G.; GARCIA, A.; PORTUGAL, J. R.; BERNART, L.; VILELA, R. G.; CAIRES, E. F.; AMADO, T.J. C.; CALONEGO, J. C.; REIS, A. R. Improving soil fertility with lime and phosphogypsum enhances soybean yield and physiological characteristics. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 2, p. 26, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00765-9>.

BOSSOLANI, J. W.; SANTOS, F. L.; MENEGHETTE, H. H. A.; SANCHES, I. R.; MORETTI, L. G.; PARRA, L. F.; LAZARINI, E. Soybean in crop rotation with maize and palisade grass intercropping enhances the long-term effects of surface liming in no-till system. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 1, p. 119-130, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00347-2>.

BRIGNOLI, F. M.; GATIBONI, L. C.; MUMBACH, G. L.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; SOUZA, A. A.; GRANDO, D. L. Gypsum in Improving the Use of Phosphate

Fertilization for Soybean Crops. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 54, n. 11, p. 1468-1482, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2159039>.

BRIGNOLI, F. M.; GATIBONI, L. C.; MUMBACH, G. L.; GRANDO, D. L.; SOUZA JUNIOR, A. A.; IOCHIMS, D. A. Soybean Agronomic Performance Does Not Change with Gypsum Application in a Cambisol Submitted to Water Re-striction in Southern Brazil. **Open Journal of Agricultural Research**, p. 30-44, 2021. DOI: <https://doi.org/10.31586/ojar.2021.010106>.

BRITO, L. D. C. R.; SOUZA, H. A.; ARAÚJO NETO, R. B.; AZEVEDO, D. M. P.; SAGRILO, E.; VOGADO, R. F.; CARVALHO, S. P.; FERREIRA, A. C. M.; CAVIGELLI, M. A. Improved soil fertility, plant nutrition and grain yield of soybean and millet following maize intercropped with forage grasses and crotalaria in the Brazilian savanna. **Crop and Pasture Science**, v. 74, n. 5, p. 438-448, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP22251>.

BROWN, J. C.; KOEPPE, M.; COLES, B.; PRICE, K. P. Soybean production and conversion of tropical forest in the Brazilian Amazon: The case of Vilhena, Rondonia. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, v. 34, n. 6, p. 462-469, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1579/0044-7447-34.6.462>.

BUBLITZ, L. R.; GURGEL, A. L. C.; MAURI, A. C.; QUEIROZ, V. C.; LIMA, K. S.; CAMPELO, I. B. R.; ARAÚJO, M. J.; DIAS-SILVA, T. P.; BARROS, J. S.; AGUIAR, I. O. M.; DIFANTE, G. S.; ÍTAVO, L. C. V. *Panicum maximum* cultivars for use in integrated agricultural production systems in Cerrado biome soils. **Grassland Science**, v. 70, n. 3, p. 121-129, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/grs.12423>.

CAIRES, E. F.; ALLEONI, L. R.; CAMBRI, M. A.; BARTH, G. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 3, p. 791-798, 2005. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0207>.

CAIRES, E. F.; HALISKI, A.; BINI, A. R.; SCHARR, D. A. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 66, p. 41-53, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.02.008>.

CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 45-53, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00310.x>.

CATTELAN, A. J.; DALL'AGNOL, A. The rapid soybean growth in Brazil. **OCL**, v. 25, n. 1, p. D102, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/ocl/2017058>.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim da Safra de Grãos**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 23 ago. 2024.

COSTA, C. H. M.; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation

and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, v. 74, p. 119-132, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.001>

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BOSSOLANI, J. W.; CASTILHOS, A. M. D.; NASCIMENTO, C. A. C.; LIMA, C. G. R.; BONINI, C. S. B.; KURAMAE, E. E. Can palisade and Guinea grass sowing time in intercropping systems affect soybean yield and soil chemical properties?. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 81, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00081>.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BOSSOLANI, J. W.; PASCOALOTO, I. M.; LIMA, C. G. R.; BONINI, C. S. B.; CASTILHOS, A. M.; CALONEGO, J. C. Soybean yield and nutrition after tropical forage grasses. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 121, p. 31-49, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10157-2>.

COSTA, R. F.; FIRMANO, R. F.; BOSSOLANI, J. W.; ALLEONI, L. R. Soil chemical properties, enzyme activity and soybean and corn yields in a tropical soil under no-till amended with lime and phosphogypsum. **International Journal of Plant Production**, v. 17, n. 2, p. 235-250, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-023-00233-8>.

CRUSCIOL, C. A. C.; FERREIRA, J. H. S.; MOMESSO, L.; PORTUGAL, J. R.; CAMPOS, M.; VOLF, M. R.; BORGHI, E.; SORATTO, R. P.; CALONEGO, J. C. Lasting effect of *Urochloa brizantha* on a common bean-wheat-maize rotation in a medium-term no-till system. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, p. 940996, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.940996>.

CRUSCIOL, C. A.; ARTIGIANI, A. C.; ARF, O.; CARMEIS FILHO, A. C.; SORATTO, R. P.; NASCENTE, A. S.; ALVAREZ, R. C. Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system. **Catena**, v. 137, p. 87-99, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.09.009>.

CRUSCIOL, C. A.; NASCENTE, A. S.; BORGHI, E.; SORATTO, R. P.; MARTINS, P. O. Improving soil fertility and crop yield in a tropical region with palisadegrass cover crops. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2271-2280, 2015. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj14.0603>.

CUNHA, A. M. Q.; MACEDO, V. H. M.; OLIVEIRA, J. K. S.; MELO, D. D. M.; DOMINGUES, F. N.; CÂNDIDO, E. P.; FATURI, C.; RÉGO, A. C. Nitrogen fertilisation as a strategy for intensifying production and improving the quality of Massai grass grown in a humid tropical climate. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 14, p. 2213-2227, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2046078>.

DEINES, J. M.; GUAN, K.; LOPEZ, B.; ZHOU, Q.; WHITE, C. S.; WANG, S.; LOBELL, D. B. Recent cover crop adoption is associated with small maize and soybean yield losses in the United States. **Global change biology**, v. 29, n. 3, p. 794-807, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16489>.

DELFIM, J.; MOREIRA, A.; MORAES, L. A. Wheat growth, yield, nutrient concentration and soil chemical properties influenced by liming in an acid

soil. **Journal of Plant Nutrition**, p. 1-14, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2378229>.

DEUS, A. C. F.; BÜLL, L. T.; GUPPY, C. N.; SANTOS, S. D. M. C.; MOREIRA, L. L. Q. Effects of lime and steel slag application on soil fertility and soybean yield under a no till-system. **Soil and Tillage Research**, v. 196, p. 104422, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104422>.

DUVAL, M. E.; GALANTINI, J. A.; CAPURRO, J. E.; MARTINEZ, J. M. Winter cover crops in soybean monoculture: Effects on soil organic carbon and its fractions. **Soil and Tillage Research**, v. 161, p. 95-105, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.006>.

FAN, B.; DING, J.; FENTON, O.; DALY, K.; CHEN, Q. Understanding phosphate sorption characteristics of mineral amendments in relation to stabilising high legacy P calcareous soil. **Environmental Pollution**, v. 261, p. 114175, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114175>.

FEITOSA, M. M.; SOUSA, E. C.; NASCIMENTO, L.; LEMOS, J. D. J. S. A soja no estado do Maranhão, Brasil: uma análise temporal da expansão e substituição das culturas alimentares. **Geografares**, n. 37, n. 37, p. 114-131, 2023. DOI: <https://doi.org/10.47456/geo.v3i37.40394>.

FERREIRA, M. E.; FERREIRA JÚNIOR, L. G.; MIZIARA, F.; SOARES-FILHO, B. S. Modeling landscape dynamics in the central Brazilian savanna biome: future scenarios and perspectives for conservation. **Journal of Land Use Science**, v. 8, n. 4, p. 403-421, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1080/1747423X.2012.675363>.

FONTOURA, S. M. V.; PIAS, O. H. C.; TIECHER, T.; CHERUBIN, M. R.; MORAES, R. P.; BAYER, C. Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 193, p. 27-41, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.005>.

GARLAND, G.; BÜNEMANN, E. K.; OBERSON, A.; FROSSARD, E.; SIX, J. Plant-mediated rhizospheric interactions in maize-pigeon pea intercropping enhance soil aggregation and organic phosphorus storage. **Plant and Soil**, v. 415, p. 37-55, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3145-1>.

HARASIM, E.; GAWĘDA, D.; WESOŁOWSKI, M.; KWIATKOWSKI, C.; GOCÓŁ, M. Cover cropping influences physico-chemical soil properties under direct drilling soybean. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science**, v. 66, n. 1, p. 85-94, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1066420>.

HARRISON, H. F.; THIES, J. A.; FERY, R. L.; SMITH, J. P. Evaluation of cowpea genotypes for use as a cover crop. **HortScience**, v. 41, n. 5, p. 1145-1148, 2006. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.5.1145>.

HARUNA, S. I.; NKONGOLO, N. V. Influence of cover crop, tillage, and crop rotation management on soil nutrients. **Agriculture**, v. 10, n. 6, p. 225, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10060225>.

HASSAN, H. H.; EL-SOBKY, E. S. E.; MANSOUR, E.; EL-KHOLY, A. S.; ULLAH, H.; DATTA, A. Influence of preceding crop and tillage system on forage yield and quality of selected summer grass and legume forage crops under arid conditions. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 21, n. 11, p. 3329-3344, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.08.088>.

HOLLAND, J. E.; BENNETT, A. E.; NEWTON, A. C.; WHITE, P. J.; MCKENZIE, B. M.; GEORGE, T. S.; PAKEMAN, R. J.; BAILEY, J. S.; FORNARA, D. A.; HAYES, R. C. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review. **Science of the total environment**, v. 610, p. 316-332, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.020>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>. Acesso em: 12 jul 2024.

INAGAKI, T. M.; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R. P. Why does carbon increase in highly weathered soil under no-till upon lime and gypsum use?. **Science of the Total Environment**, v. 599, p. 523-532, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.234>.

ISMAIL, S. M.; EL-NAKHLAWY, F. S.; BASAHI, J. M. Sudan grass and pearl millets productivity under different irrigation methods with fully irrigation and stresses in arid regions. **Grassland Science**, v. 64, n. 1, p. 29-39, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/grs.12179>.

JENSEN, E. S.; CARLSSON, G.; HAUGGAARD-NIELSEN, H. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. **Agronomy for sustainable development**, v. 40, n. 1, p. 5, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-020-0607-x>.

JORIS, H. A. W.; CAIRES, E. F.; BINI, A. R.; SCHARR, D. A.; HALISKI, A. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and Soil**, v. 365, p. 409-424, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1413-2>.

KIFLU, A., BEYENE, S., & JEFF, S. Fractionation and availability of phosphorus in acid soils of Hagereselam, Southern Ethiopia under different rates of lime. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 4, p. 1-7, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-017-0105-9>.

KIRKPATRICK, D.; ROBERTS, T. L.; BRYE, K.; ROSS, J. Influence of cover crops on soybean yield and partial returns as an alternative to double-crop soybean in Arkansas. **Agronomy Journal**, v. 115, n. 3, p. 1373-1383, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.21312>.

KOUDAHE, K.; ALLEN, S. C.; DJAMAN, K. Critical review of the impact of cover crops on soil properties. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 3, p. 343-354, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.03.003>.

LEITE, H. M. F.; CALONEGO, J. C.; MORAES, M. F.; MOTA, L. H. D. S. D. O.; SILVA, G. F.; NASCIMENTO, C. A. C. How a Long-Term Cover Crop Cultivation Impacts Soil Phosphorus Availability in a No-Tillage

System?. **Plants**, v. 13, n. 15, p. 2057, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13152057>.

LEITE, R. D. C.; LEITE, R. D. C.; CRAVO, M. D. S. Second-crop cowpea under residual phosphorus doses in the Brazilian Amazon. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, p. e66078, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632020v5066078>.

MAGALHÃES, L. A.; MIRANDA, E. E. **MATOPIBA: Caracterização do Quadro Natural**. Nota técnica 5. EMBRAPA. Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE), 2014. Disponível em: [https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/gite/publicacoes/NT5\\_Matopiba\\_Quadro\\_Natural.pdf](https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/gite/publicacoes/NT5_Matopiba_Quadro_Natural.pdf). Acesso em: 12 jul 2024.

MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A.; HE, Z. Non-labile phosphorus acquisition by *Brachiaria*. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, n. 9, p. 1319-1327, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1109117>.

MERLOTI, L. F.; BOSSOLANI, J. W.; MENDES, L. W.; ROCHA, G. S.; RODRIGUES, M.; ASSELTA, F. O.; CRUSCIOL, C. A. C.; TSAI, S. M. Investigating the effects of *Brachiaria* (Syn. *Urochloa*) varieties on soil properties and microbiome. **Plant and Soil**, p. 1-18, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06225-x>.

MINATO, E. A.; BRIGNOLI, F. M.; NETO, M. E.; BESEN, M. R.; CASSIM, B. M. A. R.; LIMA, R. S.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Lime and gypsum application to low-acidity soils: changes in soil chemical properties, residual lime content and crop agronomic performance. **Soil and Tillage Research**, v. 234, p. 105860, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105860>.

MIRANDA, E. E.; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. **Proposta de delimitação territorial do Matopiba**. Nota técnica 1. EMBRAPA. Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE), 2014. Disponível em: [https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/gite/publicacoes/NT1\\_DelimitacaoMatopiba.pdf](https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoMatopiba.pdf). Acesso em: 12 jul 2024.

MKHONZA, N. P.; BUTHELEZI-DUBE, N. N.; MUCHAONYERWA, P. Effects of lime application on nitrogen and phosphorus availability in humic soils. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 8634, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65501-3>.

MOREIRA, S. G.; MORAES, F. A.; PEIXOTO, D. S.; SILVA, J. C. R.; GAUDENCIO, J. R. F.; SILVA, B. M.; SILVA, M. M.; MACEDO, J. R. Deep incorporation of high limestones rates affects the macro and micronutrients availability and the accumulated grain yield in three acidic sites in Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 154, p. 127074, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127074>.

MUELLER, B.; MUELLER, C. The political economy of the Brazilian model of agricultural development: Institutions versus sectoral policy. **The Quarterly Review of Economics and Finance**, v. 62, p. 12-20, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.qref.2016.07.012>.

- NASCENTE, A. S.; CRUSCIOL, C. A. C. Cover crops and herbicide timing management on soybean yield under no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 187-192, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000200006>.
- NASCENTE, A. S.; CRUSCIOL, C. A. C.; COBUCCI, T. The no-tillage system and cover crops—Alternatives to increase upland rice yields. **European Journal of Agronomy**, v. 45, p. 124-131, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.09.004>.
- NASCENTE, A. S.; STONE, L. F. Cover crops as affecting soil chemical and physical properties and development of upland rice and soybean cultivated in rotation. **Rice Science**, v. 25, n. 6, p. 340-349, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2018.10.004>.
- NORA, D. D.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. D. S.; GRUHN, E. M. Modern high-yielding maize, wheat and soybean cultivars in response to gypsum and lime application on no-till Oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. e0160504, 2017a. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160504>.
- NORA, D. D.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. D. S.; MAZUCO, A. C. B.; PICCIN, M. Mitigation of the gradient of chemical properties in the rooting zone of dystrophic Oxisols by gypsum and lime inputs under a no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. e0150541, 2017b. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150541>.
- NYAMAIZI, S.; MESSIGA, A. J.; CORNELIS, J. T.; SMUKLER, S. M. Effects of increasing soil pH to near-neutral using lime on phosphorus saturation index and water-extractable phosphorus. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 102, n. 4, p. 929-945, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjss-2021-0197>.
- OLIVEIRA, D. B. D.; LACERDA, J. J. D. J.; CAVALCANTE, A. P.; BEZERRA, K. G.; SILVA, A. P. M. D.; MIRANDA, A. C. G.; RAMBO, T. P.; MASCHIO, R.; ANDRADE, H. A. F.; COSTA, P. M.; SOUSA, C. A. F.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. O. L.; SAGRILLO, E.; SOUZA, H. A. D. Lime and Gypsum Rates Effects in New Soybean Areas in the Cerrado of Matopiba, Brazil. **Agriculture**, v. 14, n. 7, p. 1034, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071034>.
- PACHECO, L. P.; MIGUEL, A. S. D. C. S.; SILVA, R. G. D.; SOUZA, E. D. D.; PETTER, F. A.; KAPPES, C. Biomass yield in production systems of soybean sown in succession to annual crops and cover crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 8, p. 582-591, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000800003>.
- PIAS, O. H. C.; TIECHER, T.; CHERUBIN, M. R.; SILVA, A. G.; BAYER, C. Does gypsum increase crop grain yield on no-tilled acid soils? A meta-analysis. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 2, p. 675-692, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20125>.
- PIRES, G. F.; ABRAHÃO, G. M.; BRUMATTI, L. M.; OLIVEIRA, L. J.; COSTA, M. H.; LIDDICOAT, S.; KATO, E.; LADLE, R. J. Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: Implications for land use in Northern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 228, p. 286-298, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.07.005>.

- PIRES, M. D. F. M.; MEDEIROS, J. C.; SOUZA, H. A. D.; ROSA, J. D.; BOECHAT, C. L.; MAFRA, Á. L.; NOLÊTO, K. C.; ROCHA, A. G. D. Conservation system improves soil microbial quality and increases soybean yield in the Northeastern Cerrado. **Bragantia**, v. 79, n. 4, p. 599-611, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200117>.
- PIRES, P. C. G.; OLIVEIRA, P. N.; VERAS, L. M.; GUALTER, R. M.; FERRÃO, G. E. Sustentabilidade do uso da terra no cerrado maranhense: soja e feijão-caupi. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 4, p. 589-608, 2018. DOI: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v7e42018589-608>.
- PISSINATI, A.; MOREIRA, A.; SANTORO, P. H. Yield components and nutrients content in summer cover plants used in crop rotation in no-tillage system. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 49, n. 13, p. 1604-1616, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1474899>.
- POKHREL, S.; KINGERY, W. L.; COX, M. S.; SHANKLE, M. W.; SHANMUGAM, S. G. Impact of cover crops and poultry litter on selected soil properties and yield in dryland soybean production. **Agronomy**, v. 11, n. 1, p. 119, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11010119>.
- QIN, Z.; GUAN, K.; ZHOU, W.; PENG, B.; VILLAMIL, M. B.; JIN, Z.; TANG, J.; GRANT, R.; GENTRY, L.; MARGENOT, A. J.; BOLLERO, G.; LI, Z. Assessing the impacts of cover crops on maize and soybean yield in the US Midwestern agroecosystems. **Field Crops Research**, v. 273, p. 108264, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108264>.
- REBONATTI, M. D.; CORDEIRO, C. F. S.; VOLF, M. R.; SILVA, P. C. G.; TIRITAN, C. S. Effects of silage crops between crop seasons on soybean grain yield and soil fertility in tropical sandy soils. **European Journal of Agronomy**, v. 143, p. 126685, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126685>.
- REIS, L. C.; SILVA, C. M. S. E.; BEZERRA, B. G.; MUTTI, P. R.; SPYRIDES, M. H. C.; SILVA, P. E. Analysis of climate extreme indices in the MATOPIBA region, Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, v. 177, p. 4457-4478, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02474-4>.
- RODRIGUES, M.; WITHERS, P. J. A.; SOLTANGHEISI, A.; VARGAS, V.; HOLZSCHUH, M.; PAVINATO, P. S. Tillage systems and cover crops affecting soil phosphorus bioavailability in Brazilian Cerrado Oxisols. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104770, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104770>.
- ROSOLEM, C. A.; RITZ, K.; CANTARELLA, H.; GALDOS, M. V.; HAWKESFORD, M. J.; WHALLEY, W. R.; MOONEY, S. J. Enhanced plant rooting and crop system management for improved N use efficiency. **Advances in agronomy**, v. 146, p. 205-239, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.07.002>.
- RUIS, S. J.; BLANCO-CANQUI, H.; CREECH, C. F.; KOEHLER-COLE, K.; ELMORE, R. W.; FRANCIS, C. A. Cover crop biomass production in temperate agroecozones. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 4, p. 1535-1551, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2018.08.0535>.

SANTOS, E. L. D.; RIBEIRO, R. H.; RAMALHO, B.; BRATTI, F.; ALIEVI, C.; DEBIASI, H. Soybean off-season management practices: impacts on physical and chemical soil properties and crop yield. **Revista Ceres**, v. 70, p. e70520, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X202370050020>.

SANTOS, F. C.; RESENDE, A. V.; SOARES, J. R.; VIANA, J. H. M.; SANTANA, M. L. T.; MOREIRA, S. G.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. Limestone reaction in sandy soil: Rate effects, limestone type, moisture regime, and time. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 7, n. 4, p. e70008. DOI: <https://doi.org/10.1002/agg2.70008>.

SCHENFERT, T. A.; RATKE, R. F.; CASARIN, V.; BARBOSA, J. M.; CHAVES, D. V.; HOLANDA NETO, M. R. D.; ROQUE, C. G.; CARLOS, H. C. V. Lime and gypsum in the implantation no-till system promote the nutrition and yield of soybean. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 5, p. 641-654, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1701028>.

SILVA, J. A. G.; COSTA, K. A. P.; SEVERIANO, E. C.; SILVA, A. G.; VILELA, L.; LEANDRO, W. M.; MUNIZ, M. P.; SILVA, L. M.; MENDONÇA, K. T. M.; BARROS, V. M. Efficiency of Desiccation, Decomposition and Release of Nutrients in the Biomass of Forage Plants of the Genus *Brachiaria* After Intercropping with Sorghum in Integrated Systems for Soybean Productivity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 11, p. 1644-1662, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2323076>.

SILVA, J. V. D. S.; CRUZ, S. C. S.; ALOVISI, A. M. T.; KURIHARA, C. H.; XAVIER, W. D.; MARTINEZ, M. A. Phosphate fertilizer in common beans grown with a *Brachiaria brizantha* cv. Marandú mulch. **Revista Ceres**, v. 65, p. 181-188, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201865020010>.

SIMEÃO, R. M.; SILVA, D. D. D.; SANTOS, F. C. D.; VILELA, L.; SILVEIRA, M. C. T. D.; RESENDE, A. C.; ALBUQUERQUE, P. E. P. D. Adaptation and indication of forage crops for agricultural production in sandy soils in western Bahia State, Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 45, p. e56144, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.56144>.

SINGH, G.; THILAKARATHNE, A. D.; WILLIARD, K. W.; SCHOONOVER, J. E.; COOK, R. L.; GAGE, K. L.; MCELROY, R. Tillage and legume non-legume cover cropping effects on corn–soybean production. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 4, p. 2636-2648, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agg2.20221>.

SINGH, J.; KUMAR, S. Seasonal changes of soil carbon fractions and enzyme activities in response to winter cover crops under long-term rotation and tillage systems. **European Journal of Soil Science**, v. 72, n. 2, p. 886-899, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13028>.

SINGH, S. R.; SINGH, M. K.; MEENA, K.; VISHWAKARMA, S. P. Effect of different NPK levels on fodder production of sudan grass (*Sorghum bicolor* var. Sudanese). **International Journal of Bio-resource and Stress Management**, v. 12, n. 3, p. 199-204, 2021. DOI: <https://doi.org/10.23910/1.2021.2229>.

SOUSA, D. C.; MEDEIROS, J. C.; DALLA ROSA, J.; MAFRA, A. L.; MENDES, W. S. Chemical attributes of agricultural soil after the cultivation of cover

crops. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 11, p. 1497-1503, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.11.pne799>.

SPERA, S. A.; GALFORD, G. L.; COE, M. T.; MACEDO, M. N.; MUSTARD, J. F. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, v. 22, n. 10, p. 3405-3413, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13298>.

STAGNARI, F.; MAGGIO, A.; GALIENI, A.; PISANTE, M. Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 4, p. 1-13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0085-1>.

STRICKLAND, M. S.; THOMASON, W. E.; AVERA, B.; FRANKLIN, J.; MINICK, K.; YAMADA, S.; BADGLEY, B. D. Short-term effects of cover crops on soil microbial characteristics and biogeochemical processes across actively managed farms. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 2, n. 1, p. 1-9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2134/age2018.12.0064>.

STYBAYEV, G.; ZARGAR, M.; SEREKPAYEV, N.; ZHARLYGASSOV, Z.; BAITELENOVA, A.; NOGAEV, A.; MUKHANOV, N.; ELSERGANI, M. I. M.; ABDIEE, A. A. A. Spring-Planted Cover Crop Impact on Weed Suppression, Productivity, and Feed Quality of Forage Crops in Northern Kazakhstan. **Agronomy**, v. 13, n. 5, p. 1278, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13051278>.

TANAKA, K. S.; CRUSCIOL, C. A.; SORATTO, R. P.; MOMESSO, L.; COSTA, C. H.; FRANZLUEBBERS, A. J.; OLIVEIRA JÚNIOR, A.; CALONEGO, J. C. Nutrients released by Urochloa cover crops prior to soybean. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 113, p. 267-281, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-019-09980-5>.

TIECHER, T.; CALEGARI, A.; CANER, L.; RHEINHEIMER, D. S. Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, v. 308, p. 78-85, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.028>.

TURMEL, M. S.; SPERATTI, A.; BAUDRON, F.; VERHULST, N.; GOVAERTS, B. Crop residue management and soil health: A systems analysis. **Agricultural Systems**, v. 134, p. 6-16, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.05.009>.

TYLER, H. L. Winter cover crops and no till management enhance enzyme activities in soybean field soils. **Pedobiologia**, v. 81, p. 150666, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2020.150666>.

USDA - United States Department of Agriculture. **World Agricultural Production**. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>. ANO. Acesso em: 23 ago. 2024.

VALENTINUZZI, F.; MIMMO, T.; CESCO, S.; AL MAMUN, S.; SANTNER, J.; HOEFER, C.; OBURGER, E.; ROBINSON, B.; LEHTO, N. The effect of lime on the rhizosphere processes and elemental uptake of white lupin. **Environmental**

**and Experimental Botany**, v. 118, p. 85-94, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.06.010>.

VINCENT-CABOUD, L.; CASAGRANDE, M.; DAVID, C.; RYAN, M. R.; SILVA, E. M.; PEIGNE, J. Using mulch from cover crops to facilitate organic no-till soybean and maize production. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 39, p. 1-15, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0590-2>.

WHITE, K. E.; CAVIGELLI, M. A.; BAGLEY, G. Legumes and nutrient management improve phosphorus and potassium balances in long-term crop rotations. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 3, p. 2681-2697, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20651>.

WITTEWER, R. A.; DORN, B.; JOSSI, W.; HEIJDEN, M. G. V. D. Cover crops support ecological intensification of arable cropping systems. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 41911, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep41911>.

WULANNINGTYAS, H. S.; GONG, Y.; LI, P.; SAKAGAMI, N.; NISHIWAKI, J.; KOMATSUZAKI, M. A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104749, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104749>.

YANG, C.; ZHANG, S.; TAN, G.; ZHU, S.; WANG, J. Effects of cover crops and nitrogen fertilization on soil physical properties, carbon and nitrogen fractions, and winter wheat yield in the Chinese loess plateau: A 4-year field experiment. **Field Crops Research**, v. 312, p. 109400, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109400>.

ZIKI, S. J. L.; ZEIDAN, E. M. I.; EL-BANNA, A. Y. A.; OMAR, A. E. A. Influence of cutting date and nitrogen fertilizer levels on growth, forage yield, and quality of sudan grass in a semiarid environment. **International Journal of Agronomy**, v. 2019, n. 1, p. 6972639, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/6972639>.

## **CAPÍTULO I – Culturas de cobertura otimizam a fertilidade do solo e a produtividade da soja no Cerrado do Nordeste brasileiro**

### **Resumo**

O cultivo da soja no Cerrado do Nordeste do Brasil enfrenta o desafio de manter o manejo sustentável do solo. O uso de culturas de cobertura (CC) pode ser uma estratégia para melhorar a fertilidade do solo e garantir uma produção sustentável. O objetivo do estudo foi avaliar o potencial de culturas de cobertura para melhorar a fertilidade do solo, nutrição e produtividade da soja cultivada no Cerrado do Nordeste do Brasil. O estudo foi realizado em uma fazenda localizada no estado do Maranhão, Brasil, com CC precedendo o cultivo da soja: i) milheto (*Pennisetum glaucum* L.); ii) *Urochloa brizantha* 'Marandu'; iii) *Urochloa ruziziensis* 'Ruziziensis'; iv) *Megathyrsus maximum* 'Tanzania'; v) *Megathyrsus maximum* 'Massai'; vi) feijão-caupi (*Vigna unguiculate* L.); vii) feijão-guandu (*Cajanus cajan* L.) e viii) *Crotalaria juncea*, além do posuio como controle. Propriedades químicas e biológicas do solo, teores de nutrientes foliares da soja e rendimento de sementes de soja cultivada em sucessão às CC foram avaliadas. O carbono microbiano do solo foi favorecido pelo cultivo prévio de 'Marandu', 'Ruziziensis', 'Tanzania' e feijão-caupi, em comparação ao pousio. O nitrogênio microbiano do solo foi favorecido pelo cultivo prévio de feijão-caupi, feijão-guandu e *C. juncea*, em comparação ao pousio. A ciclagem de nutrientes promovida pelas CC contribuiu para a manutenção da qualidade química do solo e aumento nos teores de nutrientes foliares da soja. O uso das CC melhora a disponibilidade de P, Ca, Mg, S, Cu e Zn no solo. O cultivo prévio de milheto, 'Tanzania', 'Massai', feijão-caupi e *C. juncea* aumentou o rendimento da soja. As CC melhoram a fertilidade do solo, ao mesmo tempo em que aumentam a produtividade da soja, sendo, portanto, uma estratégia eficaz para atingir a produção sustentável de soja na região.

**Palavras-chave:** Agricultura conservacionista, fabaceae, *Glycine max* L., poaceae, qualidade do solo.

## CHAPTER I – Cover crops optimize soil fertility and soybean productivity in the Cerrado of Northeastern Brazil

### Abstract

Soybean cultivation in the Cerrado of Northeastern Brazil faces the challenge of maintaining sustainable soil management. The use of cover crops (CC) can be a strategy to improve soil fertility and ensure sustainable production. The objective of this study was to evaluate the potential of cover crops to improve soil fertility, nutrition and productivity of soybean cultivated in the Cerrado of Northeastern Brazil. The study was carried out on a farm located in the state of Maranhão, Brazil, with CC preceding soybean cultivation: i) pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.); ii) *Urochloa brizantha* 'Marandu'; iii) *Urochloa ruziziensis* 'Ruziziensis'; iv) *Megathyrsus maximum* 'Tanzania'; v) *Megathyrsus maximum* 'Massai'; vi) cowpea (*Vigna unguiculata* L.); vii) pigeon pea (*Cajanus cajan* L.) and viii) *Crotalaria juncea*, in addition to posuio as a control. Soil chemical and biological properties, soybean foliar nutrient contents and soybean seed yield grown in succession to CC were evaluated. Soil microbial carbon was favored by the previous cultivation of 'Marandu', 'Ruziziensis', 'Tanzania' and cowpea, compared to fallow. Soil microbial nitrogen was favored by the previous cultivation of cowpea, pigeon pea and *C. juncea*, compared to fallow. Nutrient cycling promoted by CC contributed to the maintenance of soil chemical quality and increase in soybean foliar nutrient contents. The use of CC improves the availability of P, Ca, Mg, S, Cu and Zn in the soil. The previous cultivation of millet, 'Tanzania', 'Massai', cowpea and *C. juncea* increased soybean yield. CC improves soil fertility while increasing soybean productivity, and is therefore an effective strategy to achieve sustainable soybean production in the region.

**Keywords:** Conservation agriculture, fabaceae; *Glycine max* L., Poaceae, soil quality.

## 1 Introdução

Nas últimas quatro décadas, o Cerrado no Nordeste brasileiro vem passando por uma transição de vegetação nativa para uma potência agrícola com intensa ocupação do solo para agricultura (Araújo *et al.*, 2019). A mais recente fronteira agrícola do Cerrado é chamada de MATOPIBA, uma região estratégica que compreende os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (Reis *et al.*, 2020). Destes estados, o Maranhão se destaca como região produtora de sementes, sendo a soja a cultura mais relevante (Siqueira-Neto *et al.*, 2022). Neste estado, a área semeada com soja na safra 23/24 ultrapassou um milhão de hectares, com produtividade média de 3.312 kg ha<sup>-1</sup> (Conab, 2024). A área agrícola destinada ao cultivo de soja no Maranhão corresponde a 2,9% em relação ao território brasileiro. Entretanto, a expansão da área explorada com o cultivo de soja ainda está aquém de sua capacidade, pois estima-se que o Maranhão tenha potencial para dobrar a área de Cerrado com o cultivo de soja (Almeida *et al.*, 2024).

A expansão agrícola para produção de soja no Cerrado no Nordeste brasileiro contribui para a segurança alimentar global. Por outro lado, a conversão de vegetação nativa para áreas agrícolas continua sendo o principal desafio para o desenvolvimento sustentável dos sistemas de produção de soja por representar riscos aos ecossistemas naturais (Araújo *et al.*, 2019; Pompeu, 2022). O uso de tecnologias como sistemas de plantio direto associados a culturas de cobertura (CC) proporciona uma alternativa apreciável para a redução de possíveis impactos negativos do uso do solo (Nascente; Stone, 2018). Estudos anteriores mostram que o uso de CC pode manter ou melhorar a qualidade do solo (Ghimire *et al.*, 2019; Jian *et al.*, 2020) aumentando o conteúdo e a qualidade da matéria orgânica e influenciando a biomassa e a atividade microbiana (Martínez-García *et al.*, 2018), bem como a atividade enzimática (Kim *et al.*, 2020). A melhoria do microbioma do solo, que é favorecida pelas CC, tem efeitos na fertilidade do solo (Nascente; Stone, 2018) e afeta diretamente a ciclagem de nutrientes (Hallama *et al.*, 2019; Hallama *et al.*, 2021; Romdhane *et al.*, 2019), com consequente aumento no rendimento de sementes de culturas agrícolas.

O uso de plantas de cobertura e seus efeitos benéficos no solo e nas culturas já foram bem documentados para algumas regiões do Brasil (Calonego *et al.*, 2017; Costa *et al.*, 2016; Costa *et al.*, 2021). No entanto, para o Cerrado do Maranhão, há uma lacuna notável no conhecimento científico. O potencial acúmulo de biomassa de espécies de cobertura é limitado no inverno seco (Castro *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2022a), com acúmulo de chuvas menor que 350 mm no período de entressafra (Aparecido *et al.*, 2022). Portanto, as opções de cultivo após a colheita da soja convergem principalmente para o milheto. Embora o milheto tenha sido capaz de promover melhorias na qualidade do solo e na produtividade de plantas de soja cultivadas em sucessão (Sousa *et al.*, 2023), a falta de diversificação de culturas de cobertura em sistemas de cultivo de soja pode comprometer a produtividade agrícola a longo prazo. Nesse contexto, a identificação e o uso de espécies adaptadas a cada região agrícola podem maximizar a produtividade da soja (Krenchinski *et al.*, 2018).

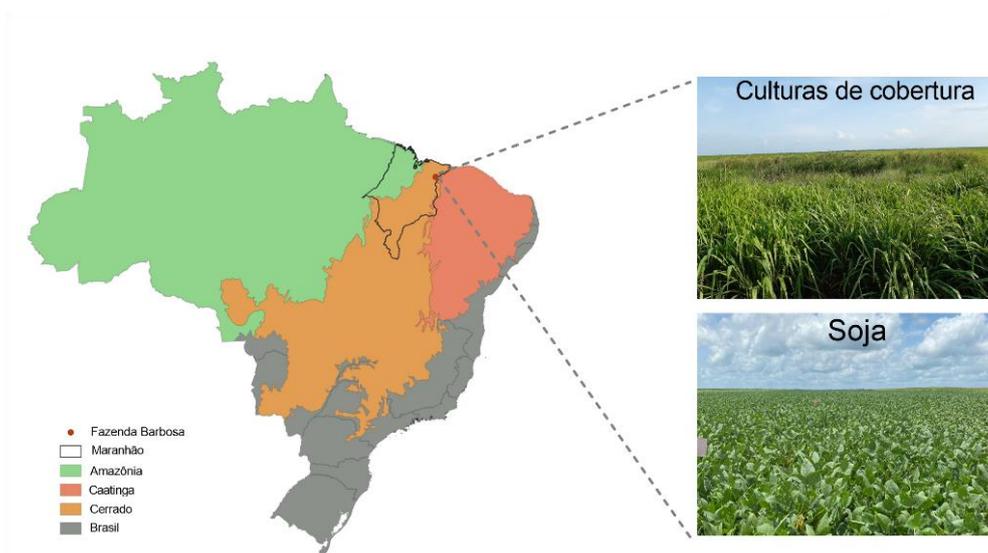
Apesar do problema do uso intensivo do milheto como única cultura de cobertura, poucos estudos abordam potenciais culturas de cobertura e ainda não exploram os benefícios em termos de seus efeitos benéficos na fertilidade do solo, ciclagem de nutrientes e produtividade da soja. Portanto, este estudo aborda questões fundamentais que ainda não foram respondidas pela exploração de culturas de cobertura que podem melhorar a qualidade do solo e ao mesmo tempo aumentar a produção sustentável de soja nas condições do Cerrado do Nordeste do Brasil. Com base nisso, o objetivo deste estudo foi: i) identificar culturas de cobertura que promovam melhorias nos atributos microbiológicos do solo; ii) avaliar os efeitos das culturas de cobertura nos atributos químicos do solo e no estado nutricional da soja; e iii) testar se as culturas de cobertura aumentam a produtividade e os grãos de soja.

## **2 Material e Métodos**

### **2.1 Localização do experimento**

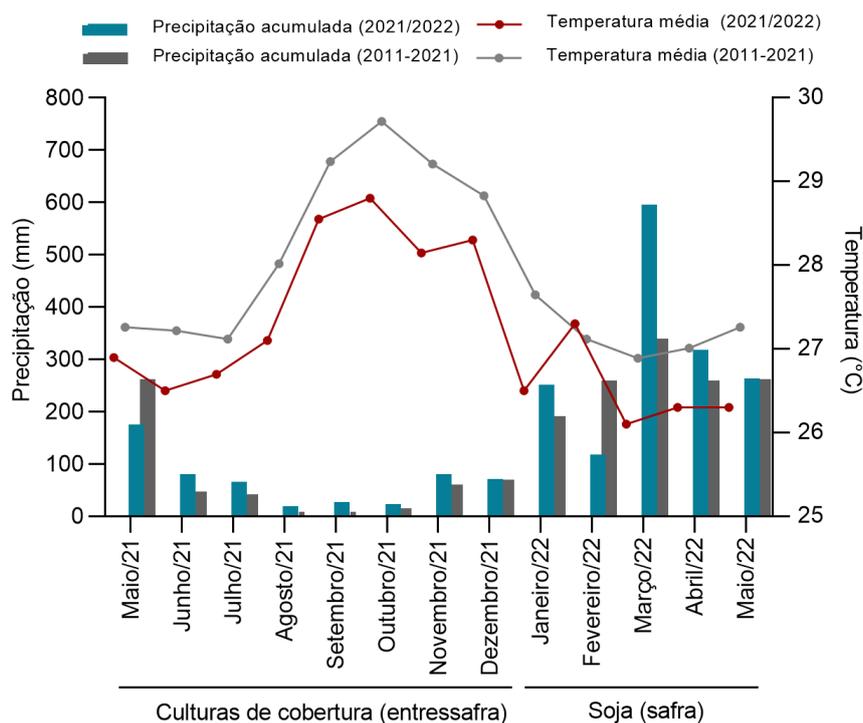
O estudo foi conduzido na Fazenda Barbosa durante a safra 2021/2022. A fazenda está localizada no município de Brejo, no Cerrado do leste do Maranhão, Brasil (03°42'44" S; 42°55'44" W; 102 m de altitude). A área

experimental está em uma região de transição entre uma condição mais seca típica do semiárido nordestino (Caatinga) e uma condição mais úmida, devido à proximidade com o Norte do Brasil e a floresta amazônica (Aparecido *et al.*, 2022) (Figura 1).



**Figura 1** Localização da área experimental. Maranhão, Brasil. 2021/22.

O clima da região é do tipo Aw (tropical, com invernos secos e verões chuvosos) segundo a classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013). Os dados de precipitação e temperatura durante o período experimental estão apresentados na Figura 2. As culturas de cobertura foram semeadas na entressafra, em maio de 2021. Durante o desenvolvimento das culturas de cobertura, houve precipitação acumulada de 353 mm e temperatura média de 27,6°C. A média histórica (10 anos) revelou que durante o período de entressafra, foram encontradas precipitações acumuladas de 514 mm e temperatura média do ar de 28,3°C. A soja foi semeada no verão chuvoso, em janeiro de 2022. Durante o ciclo de desenvolvimento da soja (janeiro a maio), foram determinadas precipitação acumulada de 1.586 mm e temperatura média de 26,5°C. A média histórica indica precipitação acumulada de 1.312 mm e temperatura média de 27,2°C durante o ciclo de desenvolvimento da soja.



**Figura 2** Dados de precipitação e temperatura do ar na área experimental durante o período de condução do experimento (2021 – 2022) e média histórica (2011 – 2021). Brejo, Maranhão, Brasil.

Fonte: *Climate Engine*.

A Fazenda Barbosa cultiva soja em sistema de plantio direto há oito anos. A área experimental foi cultivada a partir da safra 2014/2015, com milho consorciado com *Urochloa brizantha* cv. 'Marandu' rotacionado bienalmente com soja. O solo é classificado como Argissolo Amarelo segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2018), correspondendo a *Ultisol* (Soil Survey Staff, 2014). Antes da instalação do experimento, amostras de solo foram coletadas da área a uma profundidade de 0-0,20 m e submetidas a análises granulométricas e químicas (Tabela 1) segundo Teixeira *et al.* (2017).

**Tabela 1** Atributos químicos e granulometria do solo antes da condução do experimento.

pH (H <sub>2</sub> O)	COT g kg <sup>-1</sup>	P mg dm <sup>-3</sup>	K <sup>+</sup> ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	Ca <sup>2+</sup> ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	Mg <sup>2+</sup> ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg dm <sup>-3</sup>	Al <sup>3+</sup> cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	CTC
5,35	15	85	0,04	0,97	0,44	5,73	0,10	4,66
V	Cu	Fe	Mn	Zn	B	areia	silte	argila
%	----- mg dm <sup>-3</sup>			----- g kg <sup>-1</sup>			-----	
31	0,09	64	0,33	2,9	0,20	774	92	134

pH = potencial hidrogeniônico; COT = carbono orgânico total; P = fósforo; K<sup>+</sup> = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> = enxofre; Al<sup>+3</sup> = alumínio; CEC = capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases; Cu = cobre; Fe = ferro; Mn = manganês; Zn = zinco; B = boro.

## 2.2 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, constituído de três blocos e nove tratamentos, sendo estes, o pousio na entressafra (testemunha) e as seguintes CC antecedentes à soja: milheto (*Pennisetum glaucum* L.) cv. ADR300; *Urochloa brizantha* cv. 'Marandu'; *Urochloa ruziziensis* cv. 'Ruziziensis'; *Megathyrsus maximum* cv. 'Tanzânia'; *Megathyrsus maximum* cv. 'Massai'; feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.) cv. Tumucumaque; feijão-guandu (*Cajanus cajan* L.) cv. Mandarin; e *Crotalaria juncea*. Cada parcela experimental foi constituída por uma área de 4 x 6 m, totalizando 24 m<sup>2</sup>.

## 2.3 Condução e avaliação de culturas de cobertura

As culturas de cobertura foram semeadas imediatamente após a colheita da soja em maio de 2021. As sementes de gramíneas forrageiras foram semeadas a lanço na taxa de semeadura de 5 kg ha<sup>-1</sup> de sementes puras viáveis, exceto o milheto, que foi semeado na taxa de 20 kg ha<sup>-1</sup> de sementes puras viáveis. As leguminosas foram semeadas em sulcos de plantio, com espaçamento de 0,5 m entre linhas e 0,2 m entre plantas.

No início de agosto de 2021, as CC foram avaliadas quanto à produtividade de massa seca, com o auxílio de um quadro de 0,50 m<sup>2</sup>, colocado aleatoriamente em cada parcela, para delimitar a área de coleta do material vegetal. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até atingir massa constante, aproximadamente após 72 h. Após a secagem, o material vegetal foi pesado. A partir do material vegetal coletado, foram determinados o teor de nutrientes (Miyazawa *et al.*, 2009) a quantidade de lignina (Van Soest *et al.*, 1991) e calculada a relação entre lignina e nitrogênio (Lignina/N). Também foi quantificado o teor de carbono (Tedesco *et al.*, 1995), a partir do qual foi calculada a relação entre carbono e nitrogênio (C/N) (Tabela 2).

Também foi quantificada a produção de biomassa na área sob pousio, principalmente devido à ocorrência de plantas espontâneas de soja.

## 2.4 Condução e avaliação da soja

O corte e dessecação das CC ocorreram 23 e 05 dias antes da semeadura da soja, respectivamente. A cultivar de soja foi a Pampeana 90 RR, que tem hábito de crescimento semideterminado e grupo de maturação de 9.2. As plantas de soja foram cultivadas em espaçamento de 0,5 m entre linhas e população de 280.000 plantas ha<sup>-1</sup>. Antes da semeadura, as sementes foram inoculadas com cepas de *Bradyrhizobium japonicum* no sulco de plantio. As plantas de soja foram fertilizadas usando 100 kg ha<sup>-1</sup> de KCl (60% K<sub>2</sub>O) a lanço e 150 kg ha<sup>-1</sup> de MAP (11% N e 52% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), aplicados no sulco de plantio. Como cobertura, foram aplicados 200 kg ha<sup>-1</sup> de NPK 10–00–30. Aos 39 dias após a semeadura da soja (DAS), foram aplicados 0,30 kg ha<sup>-1</sup> de Kellus manganês® (13% Mn) e 0,15 kg ha<sup>-1</sup> de Kellus zinco® (15% Zn).

Em cada parcela experimental, no estágio fenológico entre o início da floração (R1) e a plena floração (R2), foram coletadas folhas recém-expandidas com pecíolos, correspondentes à terceira e quarta folha trifoliolada do ápice da planta, para avaliar o estado nutricional das mesmas (Oliveira Júnior *et al.*, 2013). Amostras de tecido vegetal foram lavadas com água, ácido clorídrico 3% e água deionizada (v:v). As amostras foram colocadas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até massa constante. Após a secagem, o material foi moído em moinho tipo Willey e passado por peneira com aberturas de 1 mm. As amostras moídas foram utilizadas para determinação dos teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn) e (boro) B, conforme procedimentos descritos em Miyazawa *et al.* (2009).

No estágio fenológico de maturidade completa da soja (R8), foram avaliados os atributos biológicos e químicos do solo. Inicialmente, em cada parcela, foram coletadas duas amostras de solo dentro da linha e duas amostras de solo entre as linhas a uma profundidade de 0,0 – 0,10 m. As amostras simples foram misturadas para formar uma amostra composta. Para a análise das propriedades biológicas do solo, as amostras foram mantidas sob refrigeração

(~3°C) por menos de 30 dias. O carbono orgânico total (COT) foi determinado usando o método modificado originalmente proposto por Walkley-Black (Teixeira *et al.*, 2017). Em relação aos atributos biológicos do solo, foram quantificados o carbono da biomassa microbiana (CBM), nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) (Ferreira *et al.*, 1999) e a respiração basal do solo (RBS) (Alef, 1995). A partir desses dados, foram calculados o quociente metabólico ( $qCO_2$ ) (Silva *et al.*, 2007) e o quociente microbiano ( $qMic$ ) (Sparling, 1992). A hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) (Chen *et al.*, 1988; Schnurer; Rosswall, 1982) e a atividade da desidrogenase (DHA) (Casida *et al.*, 1964; Bitton; Koopamn, 1986) foram utilizadas para mensurar a atividade enzimática.

Para as propriedades químicas do solo, as amostras foram submetidas à análise química de acordo com os procedimentos descritos em Teixeira *et al.* (2017). O pH do solo foi determinado pelo método do potenciômetro, na relação solo:água de 1:2,5; o potássio ( $K^+$ ) e o fósforo (P) disponíveis foram extraídos usando solução Mehlich-1, com a disponibilidade de  $K^+$  determinada por espectroscopia de absorção atômica e a disponibilidade de P determinada por espectrofotometria; o cálcio ( $Ca^{2+}$ ) e o magnésio ( $Mg^{2+}$ ) foram determinados por espectroscopia de absorção atômica após extração com KCl 1 mol L<sup>-1</sup>. O sulfato ( $S-SO_4^{2-}$ ) foi determinado por turbidimetria em espectrofotômetro após extração com  $Ca(H_2PO_4)_2$  contendo 500 mg L<sup>-1</sup> de P em HOAc 2 mol L<sup>-1</sup>. Os micronutrientes zinco (Zn), cobre (Cu), ferro (Fe) e manganês (Mn) foram extraídos usando solução Mehlich-1 e determinados usando espectroscopia de absorção atômica. O boro (B) foi determinado por espectrofotometria após usar o método de extração com água quente. Foi calculada a capacidade de troca catiônica (CTC).

Após a coleta do solo, estimou-se a produtividade da soja por meio da colheita dos grãos na área central de cada parcela (2 m<sup>2</sup>). Ajustou-se o peso seco dos grãos para 13% de umidade. Foram determinados os teores de óleo e proteína dos grãos da soja, conforme descrito em Silva e Queiroz (2006).

## 2.5 Análise estatística

Os resíduos dos dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilks,  $p < 0,05$ ). Uma vez atendido o critério, os dados foram submetidos

à análise de variância (ANOVA) para determinar o efeito dos tratamentos (pousio e culturas de cobertura). Quando foi encontrado efeito significativo pelo teste F ( $p < 0,05$ ), as médias dos tratamentos foram agrupados pelo teste de Scott-Knott. As análises foram realizadas no software estatístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2020)

### 3 Resultados

#### 3.1 Biomassa e teor de nutrientes das culturas de cobertura

O capim 'Massai' produziu uma quantidade maior de biomassa na entressafra da soja em comparação as CC e o pousio (Tabela 2). A produção de biomassa do feijão-caupi, feijão guandu e *C. juncea* foi menor quando comparadas as outras CC. O teor de N foi maior na biomassa em pousio. Leguminosas e pousio apresentaram maior teor de P na biomassa. Maior teor de K foi encontrado na biomassa do feijão-caupi e gramíneas, com exceção do milho. O feijão-caupi apresentou maior teor de Ca, Mg e B na biomassa em comparação as demais CC. Maior teor de S foi encontrado na biomassa de 'Ruziziensis', feijão-caupi e feijão-guandu. Além desses CC, maior teor de Cu também foi encontrado na biomassa de *C. juncea*. As CC apresentaram menor teor de Fe na biomassa quando comparado ao pousio. O feijão-caupi e o milho apresentam maior teor de Zn, até mesmo semelhante ao pousio. Maior teor de Mn foi encontrado na biomassa do feijão-caupi e das gramíneas 'Marandu', 'Ruziziensis' e 'Massai'. Os dados também revelaram que o feijão-guandu, o milho e o 'Massai' apresentaram relação Lignina/N mais elevada do que as demais CC. O milho e o 'Massai' também apresentaram relação C/N mais elevada em comparação as demais CC.

**Tabela 2** Biomassa e teor de nutrientes das culturas de cobertura. Brejo, Maranhão, 2021.

Culturas de cobertura	Biomassa kg ha <sup>-1</sup>	N P K Ca Mg S ----- g kg <sup>-1</sup> -----						
		Pousio	1515c	41a	3,8a	15b	7,1b	5,1b
Milho	2027b	12d	2,4b	13b	5,0c	3,6c	1,1b	
Marandu	2100b	15d	2,7b	26a	3,6c	4,5b	1,3b	
Ruziziensis	1813b	14d	2,6b	28a	4,6c	4,0c	2,4a	

Tanzânia	1980b	13d	1,1c	25a	5,0c	2,8c	1,0b
Massai	3093a	10d	1,4c	25a	3,7c	2,6c	1,3b
Feijão-caupi	728c	32b	4,3a	27a	12,1a	6,9a	2,3a
Feijão guandu	1480c	20c	4,3a	17b	5,3c	2,8c	2,2a
<i>C. juncea</i>	1068c	20c	3,6a	16b	4,6c	3,4c	1,3b
Teste F	**	**	**	**	**	**	**
CV (%)	16,8	13,2	15,7	11,1	13,4	17,7	23,7
Culturas de cobertura	Cu	Fe	Zn	Mn	B	Lignina/N	C/N
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----						
Pousio	9b	326a	42a	14b	18b	0,8c	10d
Milheto	12b	213b	46a	25b	13b	5,6a	35a
Marandu	14b	178c	22c	31a	11b	3,2b	27b
Ruziziensis	17a	209b	25b	36a	14b	2,8b	31b
Tanzânia	14b	193c	18c	21b	7c	3,1b	30b
Massai	14b	81d	16c	48a	5c	6,6a	40a
Feijão-caupi	19a	218b	47a	34a	27a	1,5c	11d
Feijão guandu	20a	72d	31b	14b	14b	7,6a	23c
<i>C. juncea</i>	19a	54d	28b	20b	11b	4,3b	21c
Teste F	**	**	**	**	**	**	**
CV (%)	18,3	9,7	17,9	25,1	20,6	22,1	14,4

N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; S = enxofre; Cu = cobre; Fe = ferro; Zn = zinco; Mn = manganês; B = boro; Lignina/N = razão entre lignina e nitrogênio; C/N = razão entre carbono e nitrogênio.

ns e \*\*: não significativo e significativo a 5% ( $p < 0,05$ ), respectivamente. Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna pertencem ao mesmo grupo segundo o teste de Scott-Knott ( $p > 0,05$ ).

### 3.2 Produtividade e composição dos grãos de soja

A produtividade dos grãos da soja foi consistentemente maior ( $p < 0,05$ ) após o cultivo de milheto (+19%), 'Tanzânia' (+22%), 'Massai' (+22%), feijão-caupi (+21%) e *C. juncea* (+20%) quando comparadas à ausência das CC (pousio). A produtividade média da soja após o cultivo dessas espécies foi de 4.403 kg ha<sup>-1</sup> de sementes (Figura 3a). O uso das CC não afetou significativamente ( $p > 0,05$ ) os teores de proteína e óleo nos grãos da soja, que permaneceram em valores médios de 40,48 e 23,31% em base seca, respectivamente (Figura 3b).



CV (%)	7,4	13,3	19,4	10,6	13,5	10,1	17,7	8,9
--------	-----	------	------	------	------	------	------	-----

COT = carbono orgânico total; NBM = nitrogênio da biomassa microbiana; CBM = carbono da biomassa microbiana; RBS = respiração basal do solo;  $qCO_2$  = quociente metabólico;  $qMic$  = quociente microbiano; DHA = atividade desidrogenase; FDA = hidrólise do diacetato de fluoresceína.

ns e \*\* = não significativo e significativo a 5% ( $p < 0,05$ ), respectivamente. Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ( $p > 0,05$ ).

As culturas de cobertura 'Marandu', 'Ruziziensis' e 'Massai' resultaram em maiores valores de RBS (28,39, 29,61 e 33,11 mg C-CO<sub>2</sub> g<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente), em comparação aos outros tratamentos. O capim 'Massai', juntamente com o milho, também apresentaram os maiores valores de  $qCO_2$  (0,29 e 0,32, respectivamente). O  $qMic$  respondeu positivamente ao cultivo de 'Marandu', 'Ruziziensis', 'Tanzania', 'Massai' e feijão-caupi, com aumento, em média, de 116,2% em relação ao pousio. Em relação à enzima desidrogenase, 'Marandu' e feijão-caupi apresentaram os maiores valores (Tabela 3).

### 3.4 Propriedades químicas do solo

A rotação entre cultura de cobertura e soja não afetou ( $p > 0,05$ ) o pH, a CTC e a disponibilidade de Fe, Mn e B no solo. Gramíneas e leguminosas apresentaram resultados contrastantes quanto à disponibilidade dos macronutrientes P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no solo. O cultivo de 'Marandu', 'Ruziziensis', feijão-caupi e guandu resultou em maior disponibilidade de P após o término do ciclo de cultivo da soja, sem diferir, no entanto, do pousio. O cultivo de 'Marandu', 'Massai', feijão-caupi e *C. juncea*, no entanto, proporcionou aumento significativo na disponibilidade de K<sup>+</sup> no solo em comparação às outras CC (16,4% em média) e ao pousio. O cultivo de feijão-guandu resultou na maior concentração de Ca<sup>2+</sup> no solo. O feijão-caupi e o guandu aumentaram a concentração de Mg<sup>2+</sup> no solo. O feijão-guandu, 'Marandu' e o pousio aumentaram a concentração de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no solo após o cultivo da soja. A disponibilidade de Cu no solo aumentou com o pré-cultivo do feijão-guandu, com valor, em média, 35% superior ao registrado para o pousio e outras CC. A concentração de Zn após o cultivo do milho, 'Marandu', 'Ruziziensis', 'Tanzania' e da leguminosa feijão-caupi foram maiores em comparação às outras CC (+43) e pousio (+49%) (Tabela 4).

**Tabela 4** Atributos químicos de solo após a sucessão culturas de cobertura/soja.

Culturas de cobertura	pH (H <sub>2</sub> O)	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
		mg dm <sup>-3</sup>	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	-----	-----	mg dm <sup>-3</sup>
Pousio	5,35	54a	0,10b	0,86d	0,49b	4,88a
Milheto	5,17	47b	0,09b	0,84d	0,44b	3,15b
Marandu	5,20	61a	0,11a	1,00c	0,49b	5,79a
Ruziziensis	5,35	65a	0,09b	1,08c	0,50b	4,09b
Tanzânia	5,31	39b	0,09b	1,10c	0,50b	3,77b
Massai	5,27	40b	0,11a	0,83d	0,54b	2,65b
Feijão-caupi	5,33	54a	0,11a	1,42b	0,68a	3,87b
Feijão guandu	5,28	64a	0,09b	1,80a	0,71a	5,06a
<i>C. juncea</i>	5,26	48b	0,11a	1,04c	0,57b	4,07b
Teste F	ns	**	**	**	**	**
CV (%)	3,5	13,1	8,0	9,0	14,5	16,3

Culturas de cobertura	Cu	Fe	Mn	Zn	B	CTC
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----					cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>
Pousio	0,11b	36	0,52	0,70b	0,19	5,38
Milheto	0,12b	46	0,51	1,61a	0,18	5,06
Marandu	0,12b	47	0,62	1,39a	0,19	4,99
Ruziziensis	0,11b	45	0,66	1,21a	0,20	5,13
Tanzânia	0,11b	35	0,49	1,18a	0,17	5,20
Massai	0,10b	46	0,56	0,85b	0,18	4,99
Feijão-caupi	0,10b	38	0,68	1,46a	0,18	5,81
Feijão guandu	0,17a	42	0,62	0,92b	0,18	6,11
<i>C. juncea</i>	0,11b	47	0,46	0,57b	0,14	5,26
Teste F	*	ns	ns	**	ns	ns
CV (%)	18,2	19,6	16,7	23,8	11,8	8,0

pH = potencial hidrogeniônico; P = fósforo; K<sup>+</sup> = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> = enxofre; Cu = cobre; Fe = ferro; Mn = manganês; Zn = zinco; B = boro; CTC = capacidade de troca de cátions.

ns e \*\* = não significativo e significativo a 5% ( $p < 0,05$ ), respectivamente. Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ( $p > 0,05$ ).

### 3.5 Diagnóstico do estado nutricional da soja

Com exceção do milheto, os resultados revelam que as CC aumentaram o teor de K nas folhas da soja. Não houve efeito significativo ( $p > 0,05$ ) das CC no teor foliar de outros macronutrientes. Os micronutrientes Fe, Mn e B responderam ao cultivo das CC de maneiras diferentes. 'Marandu', 'Ruziziensis', 'Tanzania', feijão-caupi e feijão-guandu aumentaram o teor de Fe nas folhas da soja em comparação com os outras CC e pousio. Por outro lado, 'Marandu', 'Ruziziensis', feijão-caupi e feijão-guandu, além do pousio, promoveram o maior teor de Mn nas folhas da soja. Os dados também mostraram que tanto as

leguminosas feijão-caupi quanto o feijão-guandu foram responsáveis pelo maior teor de B nas folhas de soja. (Tabela 5).

**Tabela 5** Estado nutricional da soja após o cultivo de cultura de cobertura.

Cultura de cobertura	-----g kg <sup>-1</sup> -----						-----mg kg <sup>-1</sup> -----				
	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn	B
Pousio	49,8	4,2	22,7b	6,2	4,3	3,3	9	84b	86a	121	75b
Milheto	49,7	4,0	20,7b	5,7	4,3	3,2	10	82b	69b	84	74b
Marandu	50,3	4,4	24,9a	6,1	4,2	3,9	10	90a	109a	111	65b
Ruziziensis	50,6	4,7	24,5a	5,8	4,3	3,6	9	90a	88a	131	76b
Tanzânia	49,8	4,7	24,3a	5,7	4,3	3,1	8	92a	52b	74	70b
Massai	50,4	4,8	23,6a	5,2	4,2	3,6	10	82b	56b	89	73b
Feijão-caupi	51,3	4,8	24,0a	5,5	4,1	3,2	12	87a	101a	114	90a
Feijão guandu	48,7	4,5	25,4a	5,7	4,6	3,2	11	78b	90a	109	80a
<i>C. juncea</i>	50,4	4,8	24,3a	5,5	4,3	3,6	10	87a	75b	98	69b
Teste F	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	*	**	ns	**
CV (%)	2,5	7,6	5,4	7,9	6,2	13,4	13,6	5,6	19,6	20,7	7,3

N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; S = enxofre; Cu = cobre; Fe = ferro; Zn = zinco; Mn = manganês; B = boro.

ns e \*\* = não significativo e significativo a 5% ( $p < 0,05$ ), respectivamente. Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ( $p > 0,05$ ).

#### 4 Discussão

Os dados do presente estudo demonstraram que a microbiota do solo responde ao cultivo de plantas de cobertura, mesmo em curto prazo, corroborando com estudos que relacionam a resposta de microrganismos a efeitos específicos das plantas (Steinauer *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2017). O desenvolvimento da CC coincidiu com o período seco, caracterizado por baixa precipitação (Figura 2). De modo geral, plantas que apresentam resiliência neste período e ainda produzem biomassa, conseguem disponibilizar mais recursos aos microrganismos do solo (Steinauer *et al.*, 2015). Assim, o aumento do suprimento de resíduos observado após o cultivo de ‘Marandu’, ‘Ruziziensis’, ‘Tanzania’ e feijão-caupi resulta em uma microbiota mais ativa por incorporar mais carbono à biomassa microbiana. Dentre as espécies que contribuíram para o aumento da CBM, ‘Marandu’ e feijão-caupi também se destacam por terem aumentado a atividade da enzima desidrogenase. Nivellet *et al.* (2020) mostraram a relação positiva entre a desidrogenase e a maior atividade da biomassa

microbiana do solo, em resposta à adição de substrato. O aumento do NBM após o cultivo de feijão-guandu, feijão-caupi e *C. juncea* pode ser atribuída à relação simbiótica entre espécies de leguminosas e bactérias fixadoras de N favorece o acúmulo de N da biomassa microbiana ao aumentar a entrada de N no solo por meio da fixação de N<sub>2</sub> atmosférico (Liu *et al.*, 2023).

O cultivo de leguminosas também contribuiu para o acúmulo de COT no solo. Segundo Ball *et al.* (2020), esse efeito ocorre porque essas espécies produzem uma fonte de C mais prontamente disponível. Portanto, embora as leguminosas forneçam benefícios no acúmulo de COT, esses efeitos de longo prazo podem não ser obtidos, pois geralmente apresentam rápida decomposição da biomassa. Desta forma, gramíneas como CC podem proporcionar maiores benefícios ao conteúdo de C do solo a longo prazo em um sistema de cultivo de soja, devido à alta quantidade de biomassa e maior relação C/N do resíduo (Tabela 2). Witter *et al.* (2017) destacaram que a viabilidade da inclusão das CC depende da produção de biomassa durante a entressafra. Neste estudo, 'Massai' se destacou devido à maior contribuição de resíduos vegetais ao solo. É provável que a menor incorporação de COT no solo no tratamento com 'Massai' esteja relacionada à alta relação C/N e relação lignina/N, afetando a taxa de decomposição de resíduos em curto prazo (Sievers; Cook, 2018; Adhikari *et al.*, 2024).

O alto valor da RBS após o cultivo do 'Marandu', 'Ruzizensis' e 'Massai' indica que os resíduos destas CC estimulam a atividade microbiana com consequente aumento na liberação de CO<sub>2</sub> (Marschner *et al.*, 2015; Nguyen *et al.*, 2016). Apesar do alto valor da RBS após o cultivo de 'Marandu' e 'Ruzizensis', o cultivo dessas CC foi eficiente na conversão de C da biomassa em CBM, resultando em baixo qCO<sub>2</sub>. O cultivo do 'Massai', no entanto, ainda proporcionou maior valor de qCO<sub>2</sub>. Este resultado pode estar relacionado à alta relação C/N desta gramínea (Spohn, 2015). Em condições de disponibilidade de resíduos vegetais com alta relação C/N, há um maior gasto energético (consumo de C) para cada unidade de C incorporada à biomassa microbiana. O excesso de C é liberado pela respiração, enquanto o N é incorporado ao tecido dos decompositores (Mooshammer *et al.*, 2014). Os maiores valores de qMic após o cultivo de 'Marandu', 'Ruzizensis', 'Tanzania', 'Massai' e feijão-caupi indicam que sob essas CC, a biomassa microbiana representa uma maior fração

proporcional do COT, ainda que com valores mais baixos de COT, como após o cultivo do 'Massai'. Portanto, o uso dessas CC em solos tropicais é de fundamental importância porque maiores valores de  $q_{Mic}$  representam um maior equilíbrio do reservatório de C orgânico (Balota *et al.*, 2014).

Os indicadores microbiológicos mostraram maior sensibilidade às alterações promovidas pelo cultivo de CC, respondendo de forma mais ampla e imediata às mudanças no sistema de manejo. Por outro lado, os atributos químicos do solo responderam de forma mais específica, refletindo melhorias associadas à inclusão das CC no sistema de cultivo de soja. Uma contribuição importante das CC é minimizar possíveis perdas de nutrientes no solo (Mubvumba; Tyler, 2024), como foi observado para os nutrientes P,  $K^+$ ,  $S-SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , Cu e Zn. O aumento da disponibilidade de P no solo fornecido pelo 'Marandu', 'Ruziziensis', feijão-caupi e feijão-guandu pode estar associado a diferentes estratégias de absorção de P, incluindo a exploração de um maior volume de solo propiciado pela arquitetura radicular ou mobilização de formas de P pouco solúveis (Hallama *et al.*, 2019). Além disso, gramíneas do gênero *Urochloa* podem tornar P ligado a óxidos de Fe e Al, ou mesmo à matéria orgânica do solo, disponível por meio da exsudação de ânions orgânicos (Almeida *et al.*, 2020).

Apesar disso, a disponibilidade de P no solo após o cultivo dessas espécies, bem como a concentração de  $S-SO_4^{2-}$  nos tratamentos com 'Marandu' e feijão-guandu, foram semelhantes ao tratamento de pousio. Essas respostas podem ter duas possíveis explicações: (i) algumas culturas de cobertura permitiram maior absorção de P e  $S-SO_4^{2-}$  pelas plantas de soja, reduzindo sua concentração no solo (Wei *et al.*, 2006); (ii) P e S foram absorvidos pelas plantas de culturas de cobertura, mas não mineralizados em quantidade e tempo suficientes para aumentar sua concentração no solo. A maior disponibilidade de  $S-SO_4^{2-}$  no solo cultivado com 'Marandu' e feijão-guandu sugere a importância destas culturas para minimizar possíveis perdas do  $S-SO_4^{2-}$  no perfil do solo, principalmente ao considerar a mobilidade deste ânion (Cordeiro *et al.*, 2021).

Foi observado sincronismo entre a disponibilidade de  $K^+$  pela CC e a absorção de  $K^+$  coincidindo com o período de maior demanda pela soja. O potencial das gramíneas para a ciclagem de  $K^+$  é reconhecido (Costa *et al.*, 2021) porque as gramíneas absorvem K não trocável e o tornam disponível em formas

trocáveis no solo (Crusciol *et al.*, 2015), aumentando assim o conteúdo foliar da cultura seguinte. As leguminosas também contribuíram para a nutrição foliar de K na soja, possivelmente devido à absorção de K<sup>+</sup> de camadas mais profundas e à sua disponibilização na camada superficial do solo. Os dados confirmam que, durante o pousio, a ausência de culturas de cobertura na entressafra resulta em menor retenção temporária de K<sup>+</sup> na biomassa vegetal. Como consequência, há maior risco de perda desse nutriente por lixiviação, devido à sua elevada mobilidade no solo (Segatelli *et al.*, 2022).

A matéria orgânica do solo tem grande influência na solubilidade e disponibilidade de elementos no solo, incluindo Fe (Colombo *et al.*, 2017) e Mn (Beltran *et al.*, 2021). No entanto, solos tipicamente ácidos como os do Cerrado normalmente apresentam alta disponibilidade de Fe e Mn (Lopes; Cox, 1977). Portanto, apesar das diferenças entre as CC, pode não haver limitação nas concentrações de Fe e Mn para as plantas, mesmo que esses micronutrientes sejam demandados em maiores quantidades pela soja (Pires *et al.*, 2023). A produtividade da soja pode ser mais influenciada por outros fatores, como disponibilidade de nutrientes que são mais comumente limitantes, como o B.

Ao contrário de Fe e Mn, há deficiência de B nos solos do Cerrado brasileiro (Rodrigues; Silva, 2020). Portanto, os dados deste estudo demonstram o potencial do cultivo de feijão-caupi e guandu na entressafra para fornecer B às plantas de soja cultivadas em sucessão. O teor de B na biomassa do feijão-caupi ajuda a explicar como essa CC contribui para o aumento do teor de B foliar na soja. O teor de B imobilizado na biomassa do feijão-caupi corresponde a 27 mg kg<sup>-1</sup>, ou seja, 57,4% maior que as outras CC e resíduo de pousio. Embora o feijão-guandu não tenha apresentado maior teor de B na biomassa acima do solo, parece que o teor de lignina retardou a degradação enzimática por microrganismos (Silva *et al.*, 2022b) e promoveu mineralização de B mais tardia, coincidindo com o estágio com maior pico de absorção de B (Pires *et al.*, 2023). Conforme constatado, o baixo ou alto teor de nutrientes na biomassa das CC não necessariamente resulta em alterações no estado nutricional da cultura principal, pois também é necessário determinar se as CC podem absorver nutrientes e torná-los disponíveis em tempo hábil para atender à demanda da cultura principal (Baptistella *et al.*, 2020).

Há um consenso de que maiores relações C/N dos resíduos de CC impactam negativamente o fornecimento de N para a cultura seguinte (Finney *et al.*, 2016; Lewis *et al.*, 2018). Tal consenso não se materializou no presente estudo, embora as CC tenham apresentado diferentes relações C/N. É possível que o suprimento de N por meio da fixação biológica promovida pelo cultivo da soja após as espécies de cobertura tenha mitigado os potenciais efeitos negativos das altas relações C/N, especialmente em gramíneas. A ausência de efeitos das CC no conteúdo foliar de N e no conteúdo de proteína em sementes de soja indica que as plantas não foram limitadas pela disponibilidade de N. Esse comportamento indica que o suprimento adequado de N por meio da fixação biológica e a fertilização mineral nitrogenada se sobrepôs ao efeito das CC e que seu efeito positivo na produtividade da soja não é determinado pela maior disponibilidade de N para as plantas.

No entanto, as CC desempenham um papel importante na produtividade da soja. Os dados indicam que os aumentos na produtividade estão relacionados ao sincronismo entre a liberação de nutrientes pela decomposição da serapilheira e a absorção de nutrientes pelas plantas de soja no momento em que são demandados ao longo de seu ciclo de desenvolvimento (Costa *et al.*, 2021). O cultivo de *C. juncea*, feijão-caupi, 'Massai', 'Tanzania' e milheto não só destaca o potencial do uso das CC na entressafra para aumentar a produtividade da soja, mas também o balanço positivo de nutrientes no solo, que pode ser usado pela cultura sucessora em um novo ciclo de cultivo (Rebonatti *et al.*, 2023). O cultivo de feijão-guandu, 'Marandu' e 'Ruziziensis' como culturas de cobertura resultou em rendimentos de grãos similares ao pousio, mas ainda proporcionaram benefícios na qualidade do solo e melhorias no estado nutricional da soja. Os resultados, portanto, destacam uma gama de culturas que podem ser usadas como alternativa ao milheto, permitindo diversificar as culturas de cobertura semeadas durante o inverno seco e se beneficiar durante a temporada de colheita.

## 5 Conclusão

As leguminosas aumentam o armazenamento de nitrogênio na biomassa microbiana. Com exceção do milheto, as gramíneas e o feijão-caupi aumentam

a eficiência de armazenamento de carbono na biomassa microbiana. O cultivo de culturas de cobertura na entressafra aumenta a disponibilidade de P, Ca, Mg, S, Cu e Zn no solo. A ciclagem de K por culturas de cobertura melhora o teor foliar de K na soja. A *C. juncea*, feijão-caupi, 'Massai' e 'Tanzania' são culturas de cobertura alternativas ao milho, pois não reduzem a produtividade da soja em sucessão. O cultivo do feijão guandu, 'Ruziziensis', e 'Marandu', embora não tenha resultado em aumento da produtividade da soja, mas proporciona benefícios na fertilidade do solo e, portanto, também apresentam potencial como culturas de cobertura no Cerrado do Nordeste do Brasil.

## Referencias

- ADHIKARI, A. D.; SHRESTHA, P.; GHIMIRE, R.; LIU, Z.; POLLOCK, D. A.; ACHARYA, P.; ARYAL, D. R. Cover crop residue quality regulates litter decomposition dynamics and soil carbon mineralization kinetics in semi-arid cropping systems. **Applied Soil Ecology**, v. 193, p. 105160, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105160>.
- ALEF, K. Estimation of soil respiration. *In*: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Métodos in Applied Soil Microbiology and Biochemistry**. London: Academic Press, 1995. 576p.
- ALMEIDA, D. S.; DELAI, L. B.; SAWAYA, A. C. H. F.; ROSOLEM, C. A. (2020). Exudation of organic acid anions by tropical grasses in response to low phosphorus availability. **Scientific Reports**, v. 10, p. 16955, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73398-1>.
- ALMEIDA, R. E. M.; SOUZA, H. A.; EVANGELISTA, B. A.; UHLMANN, A.; RAMOS, M. R.; SAGRILO, E.; DIAS, T. S. S.; OLIVEIRA, L. R. S. P.; COSTA, N. R. Challenges to Managing Soil Health in the Newest Agricultural Frontier in Brazil. *In*: MENDES, I. C.; CHERUBIN, M. R. (Org.). **Soil Health Series: Volume 3 Soil Health and Sustainable Agriculture in Brazil**. Wiley, 2024. p. 327-374. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780891187448.ch11>.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, 711–728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- APARECIDO, L. E. O.; MENESES, K. C.; LORENÇONE, P. A.; LORENÇONE, J. A.; MORAES, J. R. D. S. C. D.; ROLIM, G. S. Climate classification by Thornthwaite (1948) humidity index in future scenarios for Maranhão State, Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 25, n. 1, p. 855-878, 2023b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02082-9>.
- ARAÚJO, M. L. S.; SANO, E. E.; BOLFE, É. L.; SANTOS, J. R. N.; SANTOS, J. S.; SILVA, F. B. Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba

- region, Brazil (1990–2015). **Land Use Policy**, v. 80, p. 57-67, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.040>.
- BALL, K. R.; BALDOCK, J. A.; PENDOLF, C.; POWER, S. A.; WOODIN, S. J.; SMITH, P.; PENDALL, E. Soil organic carbon and nitrogen pools are increased by mixed grass and legume cover crops in vineyard agroecosystems: Detecting short-term management effects using infrared spectroscopy. **Geoderma**, v. 379, p. 114619, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114619>.
- BALOTA, E. L.; CALEGARI, A.; NAKATANI, A. S.; COYNE, M. S. Benefits of winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: A long-term study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 197, p. 31–40, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.07.010>.
- BAPTISTELLA, J. L. C.; ANDRADE, S. A. L.; FAVARIN, J. L.; MAZZAFERA, P. *Urochloa* in tropical agroecosystems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 119, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>.
- BELTRÁN, M.; GALANTINI, J. A.; SALVAGIOTTI, F.; TOGNETTI, P.; BACIGALUPPO, S.; SAINZ ROZAS, H. R.; BARRACO, M.; BARBIERI, P. A. Do soil carbon sequestration and soil fertility increase by including a gramineous cover crop in continuous soybean?. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, p. 1380– 1394, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20257>.
- BITTON, G.; BEN, K. Biochemical tests for toxicity screening. In: BITTON, G.; DUTKA, B. J. **Toxicity testing using microorganisms**. CRC Press, 1986. p. 27-55.
- CALONEGO, J. C.; RAPHAEL, J. P.; RIGON, J. P.; OLIVEIRA NETO, L.; ROSOLEM, C. A. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31–37, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.02.001>.
- CASIDA, L. E.; KLEIN, D. A.; SANTORO, T. Soil dehydrogenase activity. **Soil Science**, v. 98, n. 6, p. 371-376, 1964.
- CASTRO, G. S.; CRUSCIOL, C. A.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Management impacts on soil organic matter of tropical soils. *Vadose Zone Journal*, v. 14, p. vzj2014–07, 2015. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.07.0093>.
- CHEN, W.; HOITINK, H. A. J.; MADDEN, L. V. Microbial activity and biomass in container media for predicting suppressiveness to damping-off caused by *Pythium ultimum*. **Phytopathology**, v. 78, n. 11, p. 1447-1450, 1988.
- COLOMBO, C.; DI IORIO, E.; LIU, Q.; JIANG, Z.; BARRÓN, B. Iron oxide nonanoparticles in soils: Environmental and agronomical importance. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**. v. 17, p. 4449–4460, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2018.15294>.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim da safra de grãos**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 23 ago. 2024.
- CORDEIRO, C. F. S.; ECHER, F. R.; ARAUJO, F. F. (2021). Cover crops impact crops yields by improving microbiological activity and fertility in sandy

soil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 1968–1977, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00494-0>.

COSTA, C. H. M. D.; CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; FERRARI NETO, J. Phytomass decomposition and nutrients release from pearl millet, guinea grass and palisade grass. **Bioscience Journal**, v. 32, p. 1325–1332, 2016. DOI: <https://doi.org/10.14393/BJ-v32n5a2016-32982>.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BOSSOLANI, J. W.; PASCOALOTO, I. M.; CALONEGO, J. C. Soybean yield and nutrition after tropical forage grasses. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 121, p. 31–49, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10157-2>.

CRUSCIOL, C. A.; NASCENTE, A. S.; BORGHI, E.; SORATTO, R. P.; MARTINS, P. O. Improving soil fertility and crop yield in a tropical region with palisadegrass cover crops. **Agronomy Journal**, v. 107, p. 2271–2280, 2015. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj14.0603>.

DI RIENZO, J. A.; CASANOVES, M. G. F.; BALZARINI, L.; GONZÁLEZ, M.; TABLADA, C. W. R. 2020. **InfoStat**. Argentina: Universidad Nacional de Córdoba. Disponível em: <https://www.infostat.com.ar/index.php?mod=page&id=46&lang=en>. Acesso em: 1 de ago 2023.

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 991-996, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000400026>.

FINNEY, D. M.; WHITE, C. M.; KAYE, J. P. Biomass production and carbon/nitrogen ratio influence ecosystem services from cover crop mixtures. **Agronomy Journal**, v. 108, p. 39–52, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj15.0182>.

GHIMIRE, R.; GHIMIRE, B.; MESBAH, A. O.; SAINJU, U. M.; IDOWU, O. J. Soil health response of cover crops in winter wheat–fallow system. **Agronomy Journal**, v. 111, p. 2108–2115, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2018.08.0492>.

HALLAMA, M.; PEKRUN, C.; LAMBERS, H.; KANDELER, E. Hidden miners—the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. **Plant and Soil**, v. 434, p. 7–45, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3810-7>.

HALLAMA, M.; PEKRUN, C.; PILZ, S.; JAROSCH, K. A.; FRÄÇ, M.; UKSA, M.; MARHAN, S.; KANDELER, E. Interactions between cover crops and soil microorganisms increase phosphorus availability in conservation agriculture. **Plant and Soil**, v. 463, p. 307–328, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04897-x>.

JIAN, J.; DU, X.; REITER, M. S.; STEWART, R. D. A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. **Soil Biology and**

**Biochemistry**, v. 143, p. 107735, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107735>.

KIM, N.; ZABALOY, M. C.; GUAN, K.; VILLAMIL, M. B. Do cover crops benefit soil microbiome? A meta-analysis of current research. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 142, p. 107701, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107701>.

KRENCHINSKI, F. H.; CESCO, V. J. S.; RODRIGUES, D. M.; ALBRECHT, L. P.; WOBETO, K. S.; ALBRECHT, A. J. P. Agronomic performance of soybean grown in succession to winter cover crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 909–917, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000800005>.

LEWIS, K. L.; BURKE, J. A.; KEELING, W. S.; MCCALLISTER, D. M.; DELAUNE, P. B.; KEELING, J. W. Soil benefits and yield limitations of cover crop use in Texas High Plains cotton. **Agronomy Journal**, v. 110, p. 1616–1623, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2018.02.0092>.

LIU, Q.; ZHAO, Y.; LI, T.; CHEN, L.; CHEN, Y.; SUI, P. Changes in soil microbial biomass, diversity, and activity with crop rotation in cropping systems: A global synthesis. **Applied Soil Ecology**, v. 186, p. 104815, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104815>.

LOPES, A. S.; COX, F. R. A Survey of the Fertility Status of Surface Soils Under “Cerrado” Vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, p. 742–747, 1977. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100040026x>.

MARSCHNER, P.; HATAM, Z.; CAVAGNARO, T. R. Soil respiration, microbial biomass and nutrient availability after the second amendment are influenced by legacy effects of prior residue addition. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 88, p. 169–177, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.05.023>.

MARTÍNEZ-GARCÍA, L. B.; KORTHALS, G.; BRUSSAARD, L.; JØRGENSEN, H. B.; DE DEYN, G. B. Organic management and cover crop species steer soil microbial community structure and functionality along with soil organic matter properties. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 263, p. 7–17, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.04.018>.

MELO, W. J. D.; MELO, G. M. P. D.; MELO, V. P. D.; ARAUJO, A. S. F.; FERRAUDO, A. S.; BERTIPAGLIA, L. M. A. Soil microbial biomass and enzyme activity in six Brazilian oxisols under cropland and native vegetation. **Bragantia**, v. 79, p. 623–629, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200242>.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MURAOKA, T.; CARMO, C. A. F. S. do; MELO, W. J. Análise química de tecido vegetal. *In*: SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2009. p. 191-234

MOOSHAMMER, M.; WANEK, W.; HÄMMERLE, I.; FUCHSLUEGER, L.; HOFHANSL, F.; KNOLTSCH, A.; SCHNECKER, J.; TAKRITI, M.; WATZKA, M.; WILD, B.; KEIBLINGER, K. M.; ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S.; RICHTER, A. Adjustment of microbial nitrogen use efficiency to carbon:

nitrogen imbalances regulates soil nitrogen cycling. **Nature Communications**, v. 5, p. 3694, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms4694>.

MUBVUMBA, P.; TYLER, H. L. Evaluation of single and mixed cover crops species in a sandy loam soil under corn production. **Agronomy Journal**, v. 116, p. 1655–1669, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.21574>.

NASCENTE, A. S.; STONE, L. F. Cover crops as affecting soil chemical and physical properties and development of upland rice and soybean cultivated in rotation. **Rice Science**, v. 25, p. 340–349, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2018.10.004>.

NGUYEN, T. T.; CAVAGNARO, T. R.; NGO, H. T. T.; MARSCHNER, P. Soil respiration, microbial biomass and nutrient availability in soil amended with high and low C/N residue—Influence of interval between residue additions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 95, p. 189–197, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.12.020>.

NIVELLE, E.; VERZEAUX, J.; HABBIB, H.; KUZYAKOV, Y.; DECOCQ, G.; ROGER, D.; LACOUX, J.; DUCLERCQ, J.; SPICHER, F.; NAVA-SAUCEDO, J.; CATTEROU, M.; DUBOIS, F.; TETU, T. Functional response of soil microbial communities to tillage, cover crops and nitrogen fertilization. **Applied Soil Ecology**, v. 108, p. 147–155, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.08.004>.

OLIVEIRA JÚNIOR, A.; CASTRO, C.; OIVEIRA, F. A.; KLEPKER, D. Fertilidade do solo e estado nutricional da soja. *In*: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JÚNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. C. (Eds.). **Tecnologias de Produção de Soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020, p. 133-184.

PIRES, M. F. M.; SOUZA, H. A.; MEDEIROS, J. C.; DALLA ROSA, J.; SOUZA MARTINS, R. V.; SOBRAL, A. H. S.; CARVALHO, S. P.; VERA, G. S.; VIEIRA, P. F. M. J.; SAGRILO, E. Nutrient uptake by soybean plants in succession of cover crops in northeast of Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 54, p. 945–963, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2137183>.

POMPEU, J. Legal deforestation can jeopardize plant diversity conservation in an agricultural frontier in the Brazilian Cerrado: a spatial explicit contribution to Santana and Simon (2022). **Biodiversity and Conservation**, v. 31, p. 2899–2903, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-022-02455-0>.

REBONATTI, M. D.; CORDEIRO, C. F. S.; VOLF, M. R.; SILVA, P. C. G.; TIRITAN, C. S. Effects of silage crops between crop seasons on soybean grain yield and soil fertility in tropical sandy soils. **European Journal of Agronomy**, v. 143, p. 126685, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126685>.

REIS, L.; SILVA, C. M. S. E.; BEZERRA, B.; MUTTI, P.; SPYRIDES, M. H.; SILVA, P.; MAGALHÃES, T.; FERREIRA, R.; RODRIGUES, D.; ANDRADE, L. Influence of climate variability on soybean yield in Matopiba, Brazil. **Atmosphere**, v. 11, p. 1130, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11101130>.

RODRIGUES, L. U.; SILVA, R. R. Boron availability in building up fertility in Cerrado soil of Tocantins. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 51, p. 595–603, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1729371>.

ROMDHANE, S.; SPOR, A.; BUSSET, H.; FALCHETTO, L.; MARTIN, J.; BIZOUARD, F.; BRU, D.; BREUIL, M.; PHILIPPOT, L.; CORDEAU, S. Cover crop management practices rather than composition of cover crop mixtures affect bacterial communities in no-till agroecosystems. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 1618, 2019. DOI:

<https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01618>.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 356 p.

SCHNURER, J.; ROSSWALL, T. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 43, n. 6, p. 1256-1261, 1982. DOI:

<https://doi.org/10.1128/aem.43.6.1256-1261>.

SEGATELLI, C. R.; CÂMARA, G. M. D. S.; AGUILA, L. S. H. D.; AGUILA, J. S. D.; FRANCISCO, E. A. B.; PIEDADE, S. M. S. Soybean yield under no-tillage system with an early Eleusine coracana fertilization. **Revista Caatinga**, v. 35, p. 308–319, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n207rc>.

SIEVERS, T.; COOK, R. L. Aboveground and root decomposition of cereal rye and hairy vetch cover crops. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, p. 147–155, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.05.0139>.

SILVA, D.; QUEIROZ, A. C. **Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos**. Viçosa: UFV. 2006. 235 p.

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. **Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C)**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007. 6 p.

SILVA, J. F. D.; GONTIJO NETO, M. M.; SILVA, G. F. D.; BORGHI, E.; CALONEGO, J. C. Soil organic matter and aggregate stability in soybean, maize and *Urochloa* production systems in a very clayey soil of the Brazilian Savanna. **Agronomy**, v. 12, p. 1652, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12071652>.

SILVA, L. S.; LAROCA, J. V. S.; COELHO, A. P.; GONÇALVES, E. C.; GOMES, R. P.; PACHECO, L. P.; CARVALHO, P. C. F.; PIRES, G. C.; OLIVEIRA, R. L.; SOUZA, J. M. A.; FREITAS, C. M.; CABRAL, C. E. A.; WRUCK, F. J.; SOUZA, E. D. Does grass-legume intercropping change soil quality and grain yield in integrated crop-livestock systems?. **Applied Soil Ecology**, v. 170, p. 104257, 2022b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104257>.

SIQUEIRA-NETO, M.; POPIN, G. V.; FERRÃO, G. E.; SANTOS, A. K.; CERRI, C. E.; FERREIRA, T. O. Soybean expansion impacts on soil organic matter in

the eastern region of the Maranhão state (Northeastern Brazil). **Soil Use and Management**, v. 38, p. 1203–1216, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12785>.

Soil Survey Staff. **Keys to Soil Taxonomy**, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 2014.

SOUSA, D. C.; ROSA, J. D.; MEDEIROS, J. C.; BOECHAT, C. L.; NÓBREGA, R. S. A.; SOUZA, H. A.; SAGRILLO, E. Microbial indicators of soil quality and soybean yield in agricultural production system using cover crops under no-tillage. **Australian Journal of Crop Science**, v. 17, p. 507–513, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.23.17.06.p3879>.

SPARLING, G. P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Australian Journal of Soil Research**, v. 30, p. 195–207, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR9920195>.

SPOHN, M. Microbial respiration per unit microbial biomass depends on litter layer carbon-to-nitrogen ratio. **Biogeosciences**, v. 12, p. 817–823, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-12-817-2015>.

STEINAUER, K.; TILMAN, D.; WRAGG, P. D.; CESARZ, S.; COWLES, J. M.; PRITSCH, K.; REICH, P. B.; WEISSER, W. W.; EISENHAUER, N. Plant diversity effects on soil microbial functions and enzymes are stronger than warming in a grassland experiment. **Ecology**, v. 96, p. 99–112, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1890/14-0088.1>.

TEDESCO, M.; GIANELLO, G.; BISSANI, C.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. **Análises de Solo, Plantas e Outros Materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 574 p.

VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B.; LEWIS, B. A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of Dairy Science**, v. 74, p. 3583-3597, 1991. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2).

WEI, X.; HAO, M.; SHAO, M.; GALE, W. J. Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization. **Soil and Tillage Research**, v. 91, p. 120–130, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.11.009>.

ZHOU, Y.; ZHU, H.; FU, S. YAO, Q. Variation in soil microbial community structure associated with different legume species is greater than that associated with different grass species. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, p. 1007, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01007>.

## **CAPÍTULO II – Corte antecipado do *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf. para cobertura de solo em sistema de cultivo de soja no MATOPIBA**

### **Resumo**

O capim-sudão (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf.) apresenta potencial como cultura de cobertura em sistema de cultivo da soja nas condições do Cerrado brasileiro devido à alta produção de biomassa sob déficit hídrico. No entanto, manter a cobertura do solo viva por maior período pode afetar negativamente a produtividade da cultura principal devido à competição por nutrientes, enquanto ainda permanecem desconhecidos os efeitos do corte antecipado da cultura de cobertura na fertilidade do solo. Este estudo objetivou avaliar a época adequada do corte do capim-sudão como cultura de cobertura, que concilie manutenção dos atributos da qualidade biológica do solo e aumento da produtividade da soja. O experimento foi desenvolvido em delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições, avaliando seis tempos de corte do capim-sudão: 150, 120, 90, 60, 30 e 07 dias antes da semeadura (DAS) da soja. O corte antecipado do capim-sudão não afetou negativamente os atributos biológicos do solo, sendo que o corte aos 150 DAS promove aumento significativo ( $p \leq 0,05$ ) do carbono da biomassa microbiana ( $111 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e do quociente microbiano ( $41 \text{ mg kg}^{-1}$ ), com carbono orgânico total correspondente a  $11 \text{ g kg}^{-1}$ . Adicionalmente, o corte antecipado aos 150 DAS aumentou a concentração de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  no solo ( $13 \text{ mg dm}^{-3}$ ). O corte antecipado aos 150, 98 e 67 DAS promoveu aumento no teor foliar de Cu ( $12 \text{ mg kg}^{-1}$ ), P ( $4,11 \text{ g kg}^{-1}$ ) e K ( $24 \text{ g kg}^{-1}$ ) na soja respectivamente. No entanto, o aumento dos teores foliares na soja não resultaram em aumento na produtividade, peso de mil grãos no teor de proteína de grãos de soja. O capim-sudão, portanto, apresenta potencial como cultura de cobertura em sistema de cultivo da soja no Cerrado do Nordeste brasileiro, sendo possível atrasar o corte em até sete dias antes da semeadura da soja, sem que haja efeitos deletérios na produtividade da soja. O corte antecipado do capim-sudão é indicado para aumentar a eficiência na incorporação de carbono na biomassa microbiana.

**Palavras-chave:** Biomassa microbiana, capim-sudão, ciclagem de nutrientes, cultura de cobertura.

## CHAPTER II – Early termination of *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf. for soil cover in soybean cultivation system in MATOPIBA

### Abstract

Sudangrass (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf.) has potential as a cover crop in soybean cultivation systems in the Brazilian Cerrado due to its high biomass production under water deficit. However, maintaining the soil cover alive for a longer period can negatively affect the productivity of the main crop due to competition for nutrients, while the effects of early cutting of the cover crop on soil fertility remain unknown. This study aimed to evaluate the appropriate time to cut Sudangrass as a cover crop, which reconciles the maintenance of soil biological quality attributes and increased soybean productivity. The experiment was developed in a randomized block design, with four replications, evaluating six times to cut Sudangrass: 150, 120, 90, 60, 30 and 07 days before soybean sowing (DAS). Early cutting of Sudangrass did not negatively affect soil biological properties, with cutting at 150 DAS promoting a significant increase ( $p \leq 0.05$ ) in microbial biomass carbon ( $111 \text{ mg kg}^{-1}$ ) and microbial quotient ( $41 \text{ mg kg}^{-1}$ ), with total organic carbon corresponding to  $11 \text{ g kg}^{-1}$ . Additionally, early cutting at 150 DAS increased the concentration of  $\text{S-SO}_4^{2-}$  in the soil ( $13 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Early cutting at 150, 98 and 67 DAS promoted an increase in the foliar content of Cu ( $12 \text{ mg kg}^{-1}$ ), P ( $4.11 \text{ g kg}^{-1}$ ) and K ( $24 \text{ g kg}^{-1}$ ) in soybeans, respectively. However, the increase in foliar contents in soybeans did not result in an increase in productivity, thousand-grain weight or soybean protein content. Sudangrass, therefore, has potential as a cover crop in soybean cultivation systems in the Cerrado of northeastern Brazil, and it is possible to delay cutting up to seven days before soybean sowing without any deleterious effects on soybean productivity. Early cutting of Sudangrass is recommended to increase the efficiency of carbon incorporation into microbial biomass.

**Keywords:** Microbial biomass, sudangrass, nutrient cycling, cover crop.

## 1 Introdução

O Brasil contribui com 39% da produção e 58% das exportações mundiais de soja (Usda, 2023). A acelerada expansão de soja no Brasil ocorre desde 2005, em uma área ocupada majoritariamente pelo Cerrado (91%), denominada de MATOPIBA (acrônimo com as sílabas iniciais dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) (Bolfe *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2023). O MATOPIBA passou por intenso processo de ocupação de terras agricultáveis, se convertendo nos últimos anos em uma importante fronteira agrícola para a produção de soja (Rausch *et al.*, 2019; Aparecido *et al.*, 2023a). Dentre os estados que compõem o MATOPIBA, o Maranhão contribuiu, entre 2005 e 2023, com 66% da expansão das áreas com o cultivo de soja, atingindo produção de 3,9 Mt de grãos, com produtividade média de 3.514 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2022/2023 (Conab, 2023).

Assim, áreas convertidas em cultivos agrícolas precisam adotar sistemas de produção conservacionistas que promovam a sustentabilidade do agroecossistema (Bender *et al.*, 2016; Xie *et al.*, 2021). O uso de gramíneas como culturas de cobertura na entressafra da soja tem sido considerada uma estratégia interessante, pois estas culturas oferecem qualidade e quantidade de resíduos adequados para a cobertura do solo (Blanco-Canqui; Jasa, 2019), sustentam a atividade e a biomassa microbiana (Cordeiro *et al.*, 2021), melhoram a fertilidade do solo (Ashworth *et al.*, 2020), com consequentes efeitos na ciclagem de nutrientes (Tanaka *et al.*, 2019). Mas para isto, a escolha da cultura de cobertura depende dos efeitos na produtividade da cultura principal (Wortman *et al.*, 2012). No Cerrado do Maranhão, o milheto é a cultura de cobertura mais adotada na entressafra do cultivo da soja (Brito *et al.*, 2023), pois há pouca possibilidade de competir por nutrientes com a soja na safra seguinte (Nascente *et al.*, 2013).

Apesar disso, a cobertura do solo fornecida pelo milheto ainda é incipiente, instigando o produtor a buscar alternativas para diversificar o sistema de produção de grãos e produzir biomassa suficiente para proteger e melhorar a saúde do solo para a próxima safra de soja (Souza *et al.*, 2024). Nesse contexto, o capim-sudão (*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf.) vem consolidando como uma cultura de cobertura promissora nas condições do Cerrado. Essa gramínea

apresenta elevado rendimento de biomassa (Nieman *et al.*, 2020), reconhecida tolerância à seca (Al-Solamaini *et al.*, 2017) e maior apresenta produtividade de biomassa do que o milho sob condição hídrica deficitária (Ismail *et al.*, 2017). Tais características são ideais na entressafra da soja, que se caracteriza pelo inverno seco (Aparecido *et al.*, 2023b).

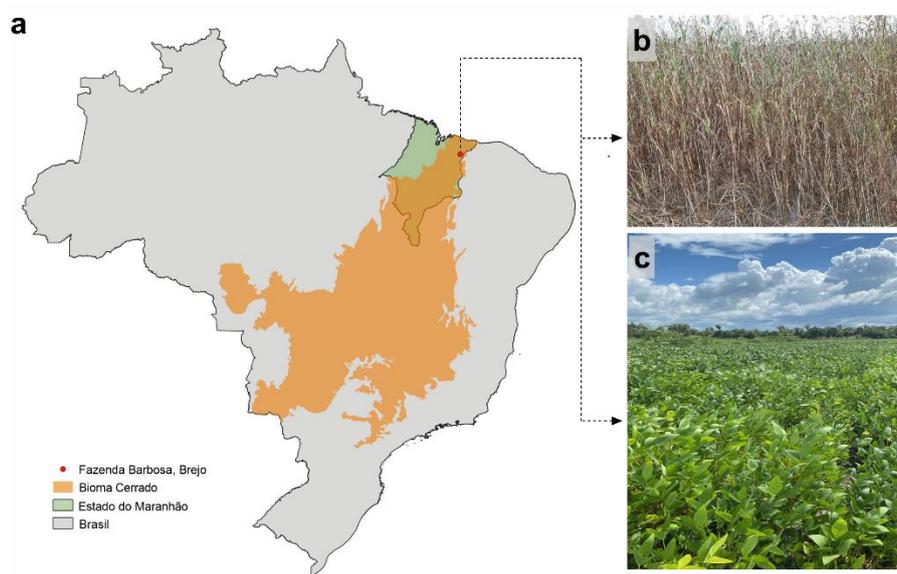
Embora apresente potencial, é indispensável buscar estratégias que fortaleçam o uso do capim-sudão, pois os benefícios dependem de decisões importantes de manejo, incluindo o tempo de corte da cultura de cobertura (Denton *et al.*, 2022). O corte tardio das culturas de cobertura pode otimizar a produção de biomassa e acúmulo de nutrientes com adequada cobertura do solo por maior período na entressafra (Baptistella *et al.*, 2020; Ruis *et al.*, 2020), mas também pode atrasar a mineralização dos nutrientes, favorecendo a competição e perdas substanciais em termos de produtividade da cultura principal (Quin *et al.*, 2021). Para superar este entrave, é importante ajustar o tempo do corte da cultura de cobertura para evitar a competição com a cultura principal e maximizar os benefícios no sistema (Abdalla *et al.*, 2019). O corte antecipado da cultura de cobertura parece uma estratégia eficiente para acelerar a decomposição dos seus resíduos e a dinâmica de liberação de nutrientes, contribuindo com melhorias no sistema solo-planta e aumento da produtividade da cultura sucessora (Mazzuchelli *et al.*, 2020; Werner *et al.*, 2020).

Com base nisto, no presente estudo foi testada a hipótese de que o corte antecipado do capim-sudão melhora os atributos de fertilidade do solo enquanto promove a ciclagem de nutrientes com celeridade e aumenta a produtividade da soja na safra seguinte. Desta forma, objetivou-se neste estudo ajustar o período adequado do corte do capim-sudão que concilie cobertura adequada do solo na entressafra para promover a manutenção ou melhorias na qualidade do solo e aumento da produtividade da soja em um sistema de produção no Nordeste do Cerrado brasileiro.

## **2 Material e Métodos**

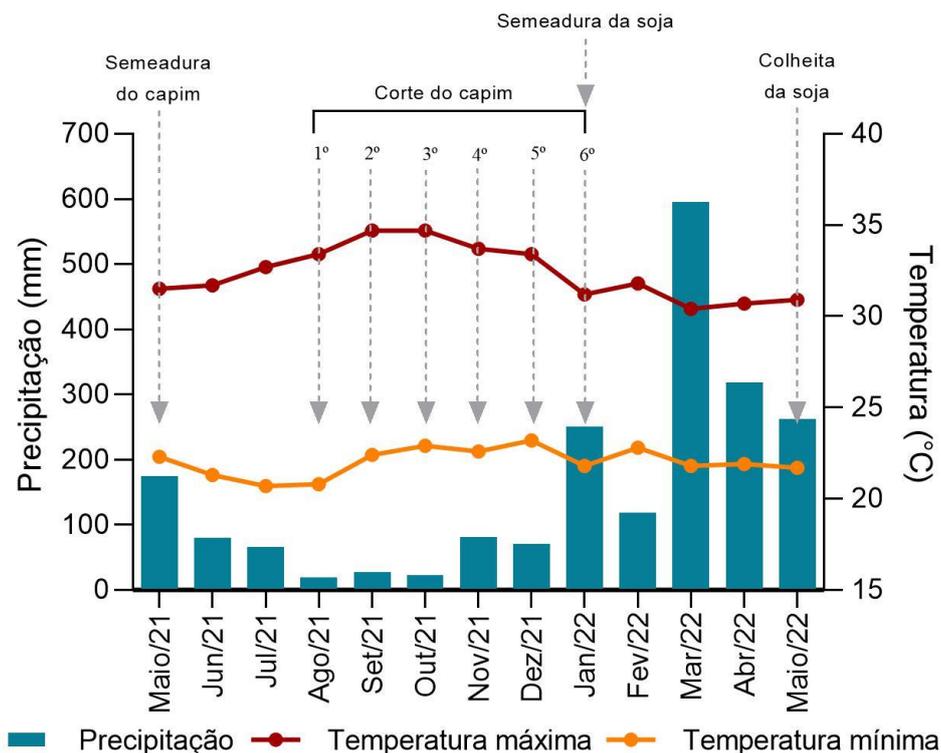
### **2.1 Área experimental**

O estudo foi avaliado entre 2021 e 2022 na Fazenda Barbosa, localizada em Brejo, município da região Leste do Maranhão, Brasil (03°42'44" S; 42°55'44" W) (Figura 1). Na área havia sido realizado o monocultivo de soja durante nove anos.



**Figura 1** Localização da área experimental (a); Capim-sudão como cultura de cobertura antecessora ao cultivo da soja (b) e; soja cultivada após o capim-sudão (c) na safra agrícola 2021/2022. Fazenda Barbosa, Brejo.

O clima da região é do tipo Aw, tropical com inverno seco entre julho e novembro e verão chuvoso entre dezembro e junho, segundo classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013). A distribuição da precipitação pluviométrica e a temperatura mínima e máxima mensal durante o período de condução do estudo é apresentada na Figura 2.



**Figura 2** Precipitação pluvial e temperatura média do ar entre os anos de 2021 e 2022 na Fazenda Barbosa, Brejo, Maranhão, Brasil.

Fonte: *Climate Engine*.

O solo da área em estudo é classificado como Argissolo Amarelo, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Santos *et al.*, 2018), correspondente ao *Ultisol* (Soil Survey Staff, 2014). Antes da instalação do experimento, amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0,0-0,20 m e submetidas à análise granulométrica e química (Teixeira *et al.*, 2017) (Tabela 1).

**Tabela 1** Análise química e granulométrica do solo antes da condução do estudo. Brejo, Maranhão, Brasil.

pH <sub>(H<sub>2</sub>O)</sub>	COT g kg <sup>-1</sup>	P mg dm <sup>-3</sup>	K <sup>+</sup> ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	Ca <sup>2+</sup> ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	Mg <sup>2+</sup> ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg dm <sup>-3</sup>	Al <sup>3+</sup> ----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	CTC
5,99	16	20	0,14	1,78	0,54	7,52	0,06	7,04
V	Cu	Fe	Mn	Zn	B	areia	silte	argila
%	----- mg dm <sup>-3</sup>			----- mg dm <sup>-3</sup>		----- g kg <sup>-1</sup>		
37	0,01	91	0,27	0,33	0,20	702	132	166

pH = potencial hidrogeniônico; COT = carbono orgânico total; P = fósforo; K<sup>+</sup> = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> = enxofre; Al<sup>3+</sup> = alumínio; CTC = capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases; Cu = cobre; Fe = ferro; Mn = manganês; Zn = zinco; e B = boro.

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições. Para avaliar o corte antecipado do capim-sudão como cultura de cobertura na entressafra da soja, foi considerado seis tempos (tratamentos) antes da semeadura da soja (DAS): 150, 120, 90, 60, 30 e 07, correspondente ao primeiro, segundo, terceiro, quarto, quinto e sexto corte, respectivamente. Os tempos de corte do capim-sudão estão representados na Figura 2. Cada parcela experimental foi composta por uma área de 8 x 4 m, totalizando 32 m<sup>2</sup>.

O capim-sudão foi semeado na entressafra do cultivo da soja, em maio de 2021. A semeadura ocorreu a lanço, com taxa de 15 kg ha<sup>-1</sup> de sementes. De acordo com os tempos estabelecidos, foi realizado o corte do capim-sudão pelo método mecânico usando uma roçadeira. Em agosto de 2021, uma amostra do material vegetal do capim-sudão foi coletada antes do início do corte aos 150 DAS. A biomassa foi seca em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até permanecer em massa constante, por aproximadamente 72 h. Posteriormente, a biomassa foi moída em moinho tipo Willey. A partir da biomassa acima do solo foi determinado o acúmulo de nutrientes (Miyazawa *et al.*, 2009), a quantidade de lignina (Van Soest *et al.*, 1991) e o teor de carbono (C) (Tedesco *et al.*, 1995). A produtividade de biomassa seca do capim-sudão foi de 7,9 t ha<sup>-1</sup>. A composição química do capim foi: nitrogênio (N) = 81,4 kg ha<sup>-1</sup>; fósforo (P) = 11,9 kg ha<sup>-1</sup>; potássio (K) = 48,2 kg ha<sup>-1</sup>; cálcio (Ca) = 11,9 kg ha<sup>-1</sup>; magnésio (Mg) = 19,0 kg ha<sup>-1</sup>; enxofre (S) = 6,1 kg ha<sup>-1</sup>; Cu (cobre) = 43,5 g ha<sup>-1</sup>; Mn (manganês) = 30,0 g ha<sup>-1</sup>; Zn (zinco) = 126,4 g ha<sup>-1</sup>; Fe (ferro) = 529,3 g ha<sup>-1</sup>; B (boro) = 110,6 g ha<sup>-1</sup>; C = 2.733 kg ha<sup>-1</sup>; e lignina = 513 kg ha<sup>-1</sup>. Foi calculado ainda a relação C:N e lignina:N que foi de 34:1 e 6:1, respectivamente.

Após o sexto corte do capim-sudão e antes da semeadura da soja, foi aplicado 2 L ha<sup>-1</sup> do herbicida Roundup® e 1 L ha<sup>-1</sup> do herbicida 2,4-D Amina CCAB 806 SL®. A cultivar de soja 3190IPRO, com grupo de maturação 9.0, foi semeada com espaçamento de 0,5 m entre linhas, em uma densidade populacional de 320.000 plantas ha<sup>-1</sup>. Antes da semeadura, as sementes foram inoculadas com estirpes de *Bradyrhizobium japonicum* no sulco de plantio. Quanto à adubação, houve aplicação antecipada de 100 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio (60% de K<sub>2</sub>O) a lanço, 150 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato monoamônico (MAP) (11% de N e 52% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) na linha da semeadura e 200 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula NPK 10–00–30 em cobertura.

## **2.2 Amostragem e avaliação das propriedades microbiológicas e químicas do solo**

No estágio fenológico de pleno florescimento da soja (R2), o estado nutricional das plantas foi avaliado por meio da coleta, em cada parcela experimental, de doze folhas recém expandidas com pecíolo, correspondentes ao terceiro trifólio a partir do ápice da planta (Oliveira Júnior *et al.*, 2020). As amostras do tecido vegetal foram lavadas com água, ácido clorídrico a 3% e água deionizada (v:v), respectivamente. As amostras foram colocadas em sacos de papel e levadas à estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até permanecerem em massa constante, aproximadamente 72 h. Após a secagem, o material foi moído em moinho tipo Willey. As amostras moídas foram submetidas à determinação dos teores foliares de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe, Mn e B, conforme descrito em Miyazawa *et al.*, 2009).

## **2.3 Amostragem e avaliação das propriedades microbiológicas e químicas do solo**

No estágio fenológico de maturação plena da soja (R8), amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0,0-0,10 m. Em cada parcela experimental, oito amostras simples de solo foram coletadas em pontos distribuídos nas linhas e nas entrelinhas de plantio, sendo posteriormente misturadas para formar uma amostra composta. Amostras também foram acondicionadas em sacos plásticos sob refrigeração (~3°C), com abertura para permitir trocas gasosas e encaminhadas para análises microbiológicas. O conteúdo restante das amostras de solo foi seco ao ar, tamisado, peneirado (malha com abertura de 2 mm de diâmetro) e homogeneizado para caracterização das propriedades químicas do solo.

O carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método modificado originalmente proposto por Walkley-Black (Teixeira *et al.*, (2017). O carbono e o nitrogênio da biomassa microbiana (CBM e NBM, respectivamente) foram estimados pelo método de irradiação-extração por micro-ondas, conforme Ferreira, Camargo e Vidor (1999). A respiração basal do solo (RBS) foi

mensurada pelo método proposto por Alef (1995), que se baseia na quantificação do CO<sub>2</sub> liberado sob incubação do solo por sete dias. Foram calculados o quociente metabólico ( $qCO_2$ ) (Silva; Azevedo; De-Pollh, 2007) e o quociente microbiano ( $qMic$ ) (Sparling, 1992). O  $qCO_2$  considera a relação entre a RBS e o CBM. O  $qMic$  corresponde à relação entre CBM e COT. A atividade da enzima desidrogenase (DHA) foi mensurada pelo método descrito por Casida *et al.* (1964) e Bitton e Ben (1989), que consiste na determinação de DHA por medição da concentração de trifetilformazan em espectrofotômetro. A atividade da enzima hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) foi estimada pela solução de diacetato de fluoresceína com posterior leitura em espectrofotômetro (Schnurer; Rosswall, 1982; Chen *et al.*, 1988).

O pH foi determinado na proporção solo:água de 1:2,5. O K<sup>+</sup> e o P disponíveis foram extraídos com solução Mehlich-1, sendo a concentração de K<sup>+</sup> determinada por espectroscopia de absorção atômica e a concentração de P determinada por espectrofotometria. O Ca<sup>2+</sup> e o Mg<sup>2+</sup> disponíveis foram extraídos com KCl 1 mol L<sup>-1</sup>, ambos determinados por espectroscopia de absorção atômica. O enxofre foi determinado por turbidimetria em espectrofotômetro após extração com [Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O] em solução acética 2 mol L<sup>-1</sup>. O Zn, Cu, Fe e Mn foram extraídos com solução Mehlich-1 e mensurados em espectroscopia de absorção atômica. O B foi determinado por espectrofotometria após o uso do método de extração com água quente. A SB foi obtida pela soma da concentração de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup>. A CTC foi calculada a partir da soma da SB e H+Al. Os procedimentos para análise das propriedades químicas estão detalhados em Teixeira *et al.* (2017).

#### **2.4 Produtividade e teor de proteína nos grãos**

No estágio fenológico de maturação plena da soja (R8), a produtividade foi estimada pela colheita dos grãos na área útil central de cada parcela (2 m<sup>2</sup>). Foi determinada a massa dos grãos com ajuste do peso seco a 13% de umidade, posteriormente convertido para a área de um hectare. Uma amostra com cem grãos escolhidos aleatoriamente em cada parcela foi utilizada para estimar o peso de mil grãos. Uma alíquota dos grãos foi selecionada para quantificar o teor de proteína, conforme mencionado em Silva e Queiroz (2006).

## 2.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilks,  $p < 0,05$ ). Atendidos aos critérios, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para determinar o efeito dos tratamentos (tempos de corte do capim-sudão) sobre as variáveis respostas. Quando verificado efeito significativo pelo teste F ( $p \leq 0,05$ ) para os tempos de corte do capim-sudão, a análise de regressão foi aplicada mediante ajuste de modelos matemáticos ( $p \leq 0,05$ ). As análises foram realizadas no programa estatístico Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2020).

## 3 Resultados

### 3.1 Propriedades microbiológicas e químicas do solo

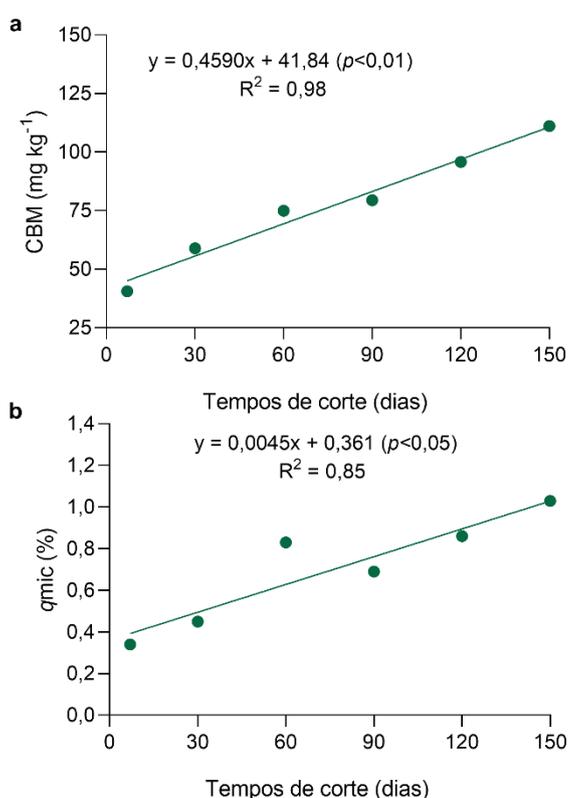
O corte precoce do capim-sudão não mostrou uma influência significativa ( $p > 0,05$ ) sobre a concentração de COT, NBM, RBS,  $qCO_2$ , bem como sobre as atividades das enzimas DHA e FDA (Tabela 2).

**Tabela 2** Atributos microbiológicos do solo em resposta ao efeito dos tempos de corte do capim-sudão, como cultura de cobertura antecessora à soja. Brejo, Maranhão, 2022.

Tempos (dias)	COT mg kg <sup>-1</sup>	NBM mg kg <sup>-1</sup>	RBS µg CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	$qCO_2$ mg CO <sub>2</sub> mg <sup>-1</sup> CBM	DHA µl g <sup>-1</sup>	FDA µg g <sup>-1</sup>
07	12,2	2,20	25	0,41	3,05	23
30	11,8	1,10	33	0,53	2,20	23
60	12,9	1,98	27	0,28	2,94	28
90	12,4	1,80	25	0,34	2,96	23
120	12,6	2,02	29	0,34	3,52	29
150	11,0	1,86	35	0,27	2,39	22
<i>p</i> -valor	0,37	0,11	0,06	0,15	0,47	0,41
CV (%)	10,7	28,5	18,2	17,6	14,5	24,4

COT = carbono orgânico total, NBM = nitrogênio da biomassa microbiana, RBS = respiração basal do solo,  $qCO_2$  = quociente metabólico, DHA = atividade da desidrogenase e FDA = hidrólise do diacetato de fluoresceína.  $p$ -valor  $\leq 0,05$  = significativo pelo teste F.  $p$ -valor  $> 0,05$  = não significativo pelo teste F.

O corte antecipado do capim-sudão influenciou significativamente ( $p < 0,01$ ) o CBM (Figura 3a). Observou-se um comportamento linear do CBM no solo com o aumento do intervalo de tempo entre os cortes do capim-sudão e a semeadura da soja. O corte do capim-sudão aos 150 dias favoreceu o incremento de CBM, cuja contribuição foi de  $111 \text{ mg kg}^{-1}$ . O capim-sudão cortado mais tardiamente (sete dias), no entanto, reduziu o CBM em 63% ( $41 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Similar ao CBM, o  $q_{\text{Mic}}$  foi também influenciado ( $p < 0,01$ ) pelos tempos de corte do capim-sudão (Figura 3b). O corte do capim-sudão realizado mais tardiamente, ou seja, aos sete dias antes da semeadura da soja, resultou na redução do  $q_{\text{Mic}}$  em 67%, em relação ao corte aos 150 DAS.



**Figura 3** Carbono da biomassa microbiana (a) e quociente microbiano (b) em resposta aos tempos de corte do capim-sudão, como cultura de cobertura antecessora à soja. Brejo, Maranhão, 2022.

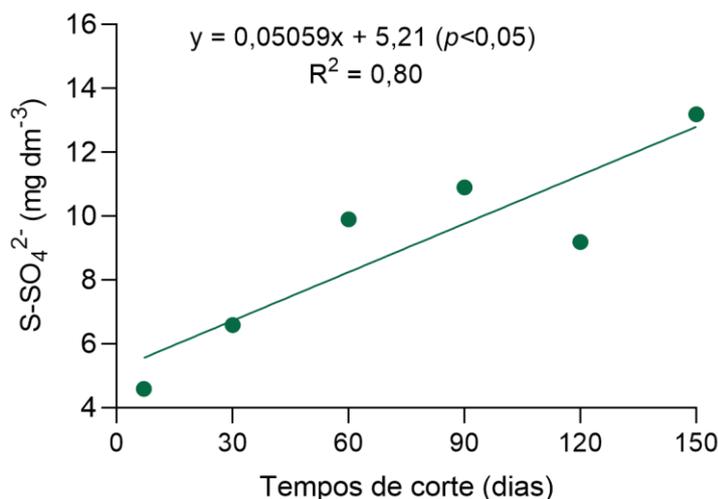
A ausência de efeitos significativos na concentração de P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cu, Fe, Mn, Zn, B e nos valores de pH, SB e a CTC do solo indica que antecipar o tempo de corte do sudão não altera significativamente ( $p > 0,05$ ) a maioria dos atributos químicos do solo durante o cultivo da soja (Tabela 3).

**Tabela 3** Atributos químicos do solo em resposta ao efeito dos tempos de corte do capim-sudão como cultura de cobertura antecessora à soja. Brejo, Maranhão, 2022.

Tempos (dias)	pH (H <sub>2</sub> O)	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SB
		mg dm <sup>-3</sup>	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			
07	5,35	38,71	0,10	1,16	0,49	1,75
30	5,55	35,52	0,08	1,42	0,65	2,15
60	5,38	35,51	0,08	1,36	0,62	2,07
90	5,38	31,79	0,08	1,18	0,50	1,76
120	5,25	35,85	0,09	1,08	0,49	1,65
150	5,40	37,80	0,09	0,99	0,47	1,55
<i>p</i> -valor	0,80	0,99	0,92	0,06	0,12	0,08
CV (%)	5,4	13,9	29,9	16,62	20,1	16,5
Tempos (dias)	Cu	Fe	Mn	Zn	B	CTC
	-----mg dm <sup>-3</sup> -----					cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>
07	0,21	73	0,46	3,79	0,19	5,03
30	0,21	80	0,39	3,96	0,20	4,74
60	0,20	68	0,44	4,00	0,23	4,82
90	0,19	62	0,39	3,39	0,19	4,73
120	0,19	69	0,38	3,68	0,18	5,02
150	0,21	66	0,35	3,86	0,18	4,87
<i>p</i> -valor	0,64	0,11	0,11	0,93	0,33	0,93
CV (%)	10,5	12,1	13,3	21,1	16,3	10,7

pH = potencial hidrogeniônico, P = fósforo, K<sup>+</sup> = potássio, Ca<sup>2+</sup> = cálcio, Mg<sup>2+</sup> = magnésio, SB = soma de bases, Cu = cobre, Fe = ferro, Mn = manganês, Zn = zinco, B = boro, e CTC = capacidade troca de cátions. *p*-valor ≤ 0,05 = significativo pelo teste F. *p*-valor > 0,05 = não significativo pelo teste F.

A concentração de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> responde significativamente (*p*<0,01) aos tempos de corte do capim (Figura 4). O corte antecipado do capim-sudão aos 150 DAS resultou em 13 mg dm<sup>-3</sup> de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no solo. Conforme houve diminuição do intervalo de tempo entre o corte do capim-sudão e a semeadura da soja, a concentração de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no solo também diminuiu, atingindo apenas 6 mg dm<sup>-3</sup>, quando o corte ocorreu tardiamente, aos sete DAS.



**Figura 4** Concentração de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no solo em resposta aos tempos de corte do capim-sudão como cultura de cobertura antecedente à soja. Brejo, Maranhão, 2022.

### 3.2 Estado nutricional da soja

Os tempos de corte do capim sudão não proporcionaram alterações significativas ( $p > 0,05$ ) nos teores foliares dos macronutrientes N, Mg e S, como também nos micronutrientes Fe, Mn, Zn e B na soja (Tabela 4).

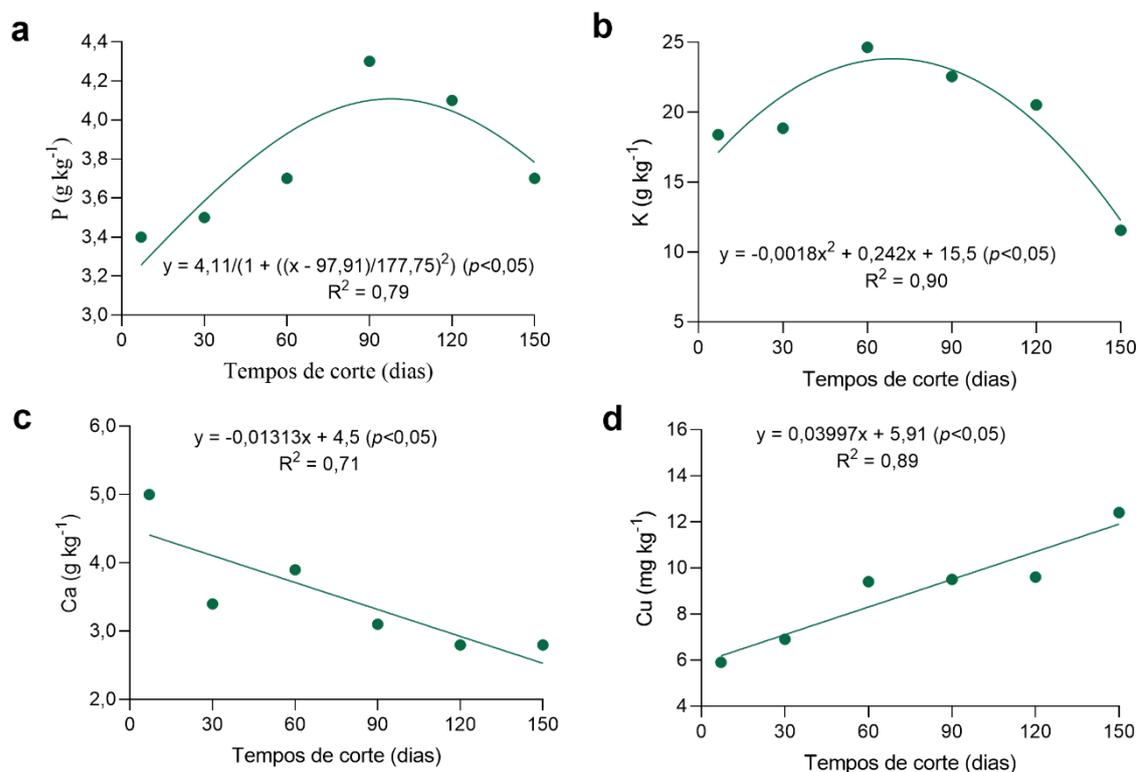
**Tabela 4** Estado nutricional da soja em resposta ao efeito dos tempos de corte do capim-sudão. Brejo, Maranhão, 2022.

Tempos (dias)	-----g kg <sup>-1</sup> -----			-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
	N	Mg	S	Fe	Mn	Zn	B
07	45,8	4,8	2,1	84	24	44	44
30	45,9	4,9	2,3	77	24	40	42
60	46,9	5,1	2,3	80	17	41	45
90	49,1	4,8	2,4	67	17	40	44
120	46,1	5,3	2,2	74	21	34	44
150	48,3	5,2	2,4	91	21	42	40
<i>p</i> -valor	0,21	0,25	0,20	0,09	0,10	0,76	0,41
CV (%)	4,7	6,9	8,4	13,3	18,8	14,6	8,9

N = nitrogênio, Mg = magnésio, S = enxofre, Fe = ferro, Mn = manganês, Zn = zinco e B = boro.  $p$ -valor < 0,05 = significativo pelo teste F.  $p$ -valor > 0,05 = não significativo pelo teste F.

O teor foliar de P (Figura 5a), K (Figura 5b), Ca (Figura 5c) e Cu (Figura 6d) na cultura da soja foram significativamente ( $p < 0,01$ ) influenciados pelo corte precoce do capim-sudão. O maior teor de P foliar correspondeu a 4,11 g kg<sup>-1</sup> quando o corte do capim ocorreu aos 98 dias, conforme indica o modelo de

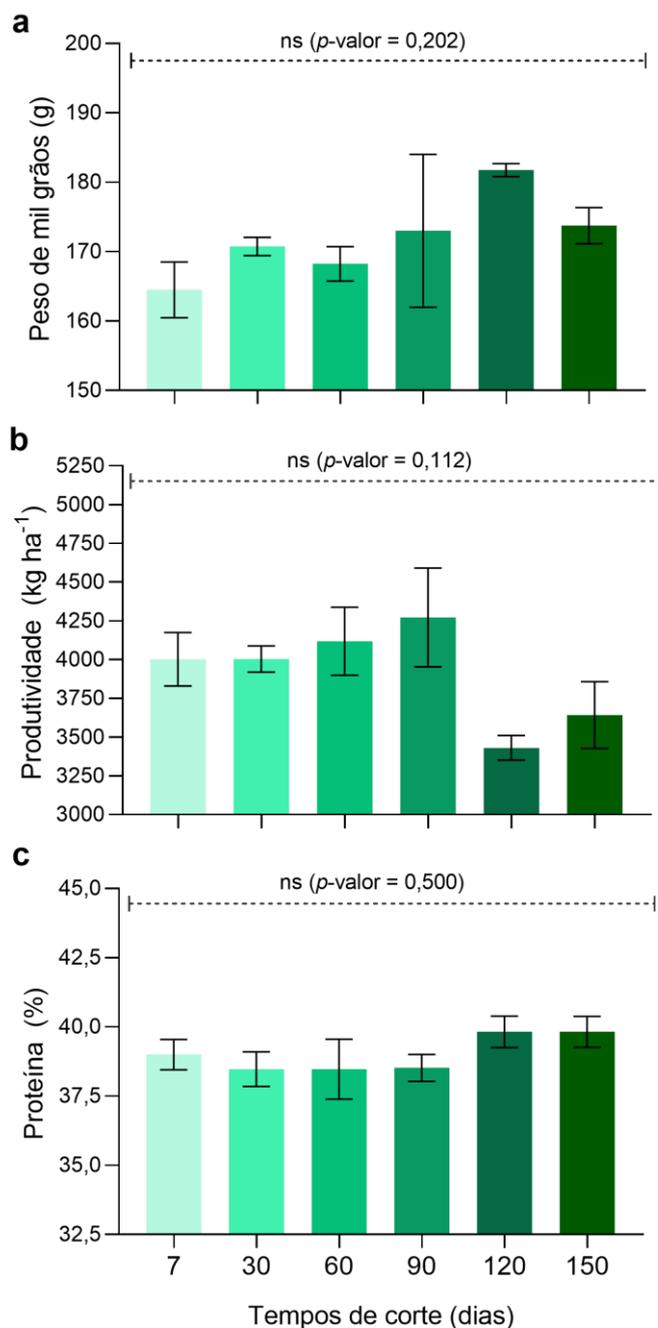
equação Lorentzian de regressão não-linear. O tempo de corte do capim-sudão aos 67 dias promoveu acréscimo no teor foliar de K, com  $24 \text{ g kg}^{-1}$ , ou seja, aumentar o intervalo entre o corte do capim e a semeadura da soja além de 67 dias, proporciona a redução do teor foliar de K na soja. O teor de Ca foliar na soja exibiu declínio linear em função dos tempos de corte. O aumento do intervalo entre o corte do capim e a semeadura da soja diminuiu o teor de Ca foliar em 44%, com  $2,8 \text{ g kg}^{-1}$  de Ca sendo observado aos 150 dias. O teor de Cu, no entanto, apresentou efeito oposto, com acréscimo de 52% na folha de soja com o corte precoce do capim-sudão, aos 150 dias.



**Figura 5** Teor foliar de P (a) K (b) Ca (c) e Cu (d) na cultura da soja em resposta aos tempos de corte do capim-sudão. Brejo, Maranhão, 2022.

### 3.3 Produtividade e teor de proteína nos grãos

O corte antecipado do capim-sudão como cultura de cobertura no sistema de cultivo da soja não alterou, significativamente ( $p > 0,05$ ), o peso de mil grãos (Figura 6a), a produtividade (Figura 6b) e o teor de proteína (Figura 6c) em grãos de soja.



**Figura 6** Peso de mil grãos (a), produtividade (b) e teor de proteína (c) de grãos de soja em resposta aos tempos de corte do capim-sudão, como cultura antecessora à soja. Brejo, Maranhão, 2022.

Colunas seguidas por barras representam a média e o erro médio padrão, respectivamente.

#### 4 Discussão

O cultivo da cultura de cobertura foi iniciado imediatamente após a colheita da cultura principal, no final do mês maio, coincidindo também com o

final da estação chuvosa na região. A precipitação acumulada de 175 mm em maio facilitou o estabelecimento inicial do capim-sudão. Após o primeiro mês, a distribuição pluviométrica foi considerada irregular, acumulando 165 mm até o momento do primeiro corte em agosto. Desta forma, as condições climáticas no período entre a semeadura do capim-sudão e o primeiro corte apresentaram precipitação acumulada de 340 mm com temperatura média de 26,8°C. Essas condições climáticas permitiram que o capim-sudão produzisse 7,9 t ha<sup>-1</sup> de biomassa seca, demonstrando seu potencial para a manutenção da cobertura do solo em sistemas de cultivo de soja em região tropical. A elevada produção de biomassa durante a estação seca reflete a rusticidade da cultura, que apresenta resistência ao déficit hídrico (Al-Solamaini *et al.*, 2017; Ismail *et al.*, 2017). Dessa forma, o capim-sudão constitui uma alternativa para diversificar a oferta de plantas de cobertura para a região do Cerrado nordestino, que ainda se restringem principalmente ao milho em sistema de cultivo com soja (Silva *et al.*, 2022).

A antecipação do corte do capim-sudão não proporcionou maior produtividade dos grãos em comparação ao corte tardio (07 DAS). Os resultados obtidos são congruentes com os reportados por Franchini *et al.* (2015) e Werner *et al.* (2022), que observaram que a dessecação precoce do gênero *Urochloa* não influencia a produtividade, peso de mil grãos e teor de proteína dos grãos de soja. Embora não seja o resultado inicialmente esperado, a ausência de impacto negativo na produção da soja ao incorporar o capim-sudão minimiza uma preocupação, possibilitando manter esta cultura de cobertura por um período mais longo no inverno e realizar o corte somente no período da semeadura da soja, ou seja, no verão com o início do aumento da precipitação.

Além disso, a ausência de efeito dos tempos de corte sobre a produtividade de grãos de soja demonstra que a incorporação do capim-sudão como planta de cobertura em sistemas produtivos não é fator limitante à obtenção de elevadas produtividades de soja. É importante ressaltar que independentemente do tempo de corte do capim-sudão, a produtividade média de grãos de soja com a incorporação da gramínea no sistema correspondeu a 3.912 kg ha<sup>-1</sup>, superior à média do estado Maranhão (3.331 kg ha<sup>-1</sup>) e do Brasil (3.029 kg ha<sup>-1</sup>) na safra agrícola 21/22 (Conab, 2023). Estes dados são relevantes, uma vez que este é o primeiro estudo amparado em investigação

científica que relata os efeitos do uso de capim-sudão como cultura de cobertura em sistema de cultivo de soja.

A relação C:N do capim-sudão correspondeu a 34:1. A relação C:N é um ótimo indicador da qualidade do resíduo e da taxa de mineralização, sendo que resíduos com maior quantidade de C induz a imobilização ou baixa mineralização do N (Jahanzad *et al.*, 2016; Otte *et al.*, 2019; Thapa *et al.*, 2022). O corte tardio do capim-sudão diminui a qualidade do resíduo, incluindo o teor de N da biomassa (Ziki *et al.*, 2019). Desta forma, o corte precoce poderia favorecer a mineralização de N e afetar positivamente a dinâmica de liberação do N da cultura de cobertura (Rosa *et al.*, 2021), com posterior efeito no teor de N foliar e no teor de proteína nos grãos da soja. Provavelmente, a inoculação das sementes de soja com bactérias fixadoras de N<sub>2</sub> associada à aplicação de N se sobrepôs a qualquer efeito decorrente do N mineralizado proveniente da palhada quando o corte do capim ocorreu antecipadamente, resultando na ausência de efeitos no teor de proteína dos grãos, conforme também reportado por Bracey *et al.* (2022).

Como o COT resulta da biomassa vegetal, o corte antecipado poderia resultar em diminuição do COT devido a um menor período da estação de crescimento da biomassa (Ruis; Blanco-Caqui, 2017). Desta forma, era esperado que o corte precoce da cultura de cobertura limitasse o período de crescimento da cultura de cobertura e, conseqüentemente o acúmulo de biomassa comparado ao corte tardio (Denton *et al.*, 2022; Liebert *et al.*, 2023). Porém, como o capim-sudão contém elevada relação C:N e lignina:N (6:1), há indícios que houve uma lenta decomposição dos resíduos e persistência no solo (Costa *et al.*, 2015; Pires *et al.*, 2022; Thapa *et al.*, 2022), provavelmente responsável pela ausência de alterações significativas nas concentrações de COT do solo. Apesar disso, o corte antecipado do capim-sudão altera as concentrações da fração de carbono ativo do solo, confirmando a eficácia deste atributo como indicador de rápidas respostas no solo à adição de carbono oriundo de resíduos das culturas de cobertura (Brito *et al.*, 2023).

O corte antecipado do capim-sudão aumentou o CBM. Assim, embora não seja possível descartar que o prolongamento da cultura de cobertura possa ter aumentado a biomassa acima do solo (Alonso-Ayuso *et al.*, 2014), é possível que o corte mais tardio do capim-sudão evitou, por maior tempo, o contato da

biomassa morta com o solo, atrasando o início do processo de decomposição devido à acessibilidade mais tardia dos microrganismos decompositores ao resíduo (Poudel *et al.*, 2023). Além disso, é possível inferir que prolongar o corte da cultura de capim-sudão, ou seja, manter a cultura viva por maior tempo no campo, aumenta a recalcitrância e reduz a qualidade do resíduo (Bloszies *et al.*, 2022).

Foi, portanto, considerado que uma maior recalcitrância e menor qualidade da biomassa foram fatores determinantes para eficiência da comunidade de microrganismos em utilizar a biomassa do capim-sudão como substrato. Portanto, quanto menor o intervalo de tempo entre o corte do capim-sudão e a semeadura da soja, menor é a capacidade da comunidade de microrganismos edáficos de converter o substrato em carbono da biomassa microbiana, o que resulta em menores valores de quociente microbiano (Bettio *et al.*, 2022). Diante deste contexto, embora o corte antecipado não tenha promovido aumento da produtividade da soja, a diminuição da estação de crescimento do capim-sudão também não afeta negativamente a qualidade biológica do solo. De fato, os valores de carbono da biomassa microbiana e de  $q_{Mic}$  aumentaram, indicando que esta prática propicia uma microbiota mais ativa, com maior incorporação da matéria orgânica no solo (Amorim *et al.*, 2020).

Não houve efeito dos tempos de corte do capim sobre os valores de RBS e o  $q_{CO_2}$ , indicando que o corte tardio do capim-sudão, ou sua antecipação não foram geradores de condições indicadoras de estresse biológico no presente estudo (Pires *et al.*, 2022). A uniformidade no fornecimento de nutrientes, assim como condições adequadas de umidade e temperatura no solo durante o desenvolvimento da soja foram fatores determinantes para a atividade microbiológica do solo (Santos *et al.*, 2021), mitigando eventuais efeitos dos tempos de corte do capim-sudão sobre a RBS e o  $q_{CO_2}$ .

As concentrações de  $S-SO_4^{2-}$  no solo foram alteradas pelos tempos de corte do sudão, aumentando à medida que houve antecipação dos tempos de corte. Isto possivelmente se deve à habilidade das gramíneas forrageiras em absorverem nutrientes de camadas subsuperficiais do solo e os liberarem à medida que seus resíduos vegetais são decompostos (Costa *et al.*, 2021). Desta forma, o capim-sudão previne a perda do ânion  $S-SO_4^{2-}$  por lixiviação para camadas subsuperficiais, que é um processo comum em solos arenosos típicos

do Cerrado brasileiro (Sousa *et al.*, 2024). O aumento da concentração de  $S-SO_4^{2-}$  no solo com corte antecipado do capim-sudão reveste-se de importância, considerando-se se tratar de um macronutriente limitante em solos do Cerrado, cujas deficiências são frequentes (Horowitz; Meurer, 2006). Apesar dos efeitos no solo, os tempos de corte do capim-sudão não influenciaram o teor foliar de  $S-SO_4^{2-}$  na soja. Estes dados sugerem que mesmo as menores concentrações deste nutriente no solo, resultantes do corte tardio do capim-sudão, não foram limitantes para o pleno desenvolvimento da soja.

O capim-sudão acumulou macronutrientes na seguinte ordem decrescente:  $N > K > Mg > Ca = P > S$ . Os micronutrientes acumulados na biomassa do capim-sudão apresentaram a seguinte ordem decrescente:  $Fe > Zn > B > Cu > Mn$ . A produção de biomassa e os teores de nutrientes nela contidos auxiliam na predição da liberação de nutrientes para a cultura seguinte (Weidhuner *et al.*, 2019). Assim, esperava-se que o corte antecipado acelerasse a decomposição do resíduo vegetal, resultando em rápida liberação de nutrientes e sua absorção subsequente pelas plantas de soja. Entretanto, este efeito foi observado de forma linear somente para o Cu, sugerindo que o corte tardio do capim-sudão retarda a liberação deste micronutriente no solo, com consequente diminuição da sua absorção pela soja.

O P e o K por sua vez, apresentaram maior concentração nas folhas de soja com o corte do capim-sudão, em período intermediário, enquanto o Ca apresentou maiores concentrações com o corte tardio da forrageira. Estes dados indicam que os tempos de corte proporcionam a melhor sincronização entre a liberação dos nutrientes P, K e Ca dos resíduos em decomposição e sua absorção pela soja (Brito *et al.*, 2023). É possível que a antecipação do corte tenha reduzido a absorção destes nutrientes, devido à sua rápida liberação na palhada remanescente, conforme observado por (Dias *et al.*, 2020; Werner *et al.*, 2020). Por isso, nem sempre a terminação precoce da cultura de cobertura é acompanhada de maiores taxas de liberação de nutrientes e melhorias no estado nutricional da cultura principal (Poudel *et al.*, 2023). O corte mais tardio da cultura de cobertura diminui os teores de P e K foliares da soja porque provavelmente o corte tardio atrasa a decomposição e liberação desses nutrientes pelos resíduos da cultura de cobertura. De todo modo, de acordo com os resultados encontrados, determinar o tempo ideal do corte do capim antes da semeadura

da soja é uma estratégia que pode afetar a dinâmica do nutriente no sistema, bem como a eficiência de uso destes nutrientes em sistema de cultivo, ao sincronizar o período demanda da cultura com o período de maior liberação de nutrientes (Silva *et al.*, 2024).

A importância do uso de gramíneas forrageiras na ciclagem e absorção de nutrientes pela cultura da soja cultivada em sucessão tem sido demonstrada em outros estudos conduzidos em regiões tropicais (Costa *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2021; Brito *et al.*, 2023). No presente estudo, são apresentadas evidências inéditas de que o capim-sudão apresenta virtudes como planta de cobertura, sendo capaz de melhorar atributos de qualidade biológica sem afetar negativamente a nutrição da soja quando o corte da cultura é realizado antecipadamente. Estes dados, aliados à rusticidade do capim-sudão, sugerem a possibilidade de incorporação desta espécie como planta de cobertura na entressafra em sistema de produção de soja no Cerrado do Maranhão. Todavia, novos estudos são necessários para avaliar os efeitos de longo prazo do capim-sudão sobre a saúde do solo, ciclagem de nutrientes e produtividade da soja em outros tipos de solos.

## 5 Conclusão

O capim-sudão possui elevada capacidade de produção de biomassa na estação seca (entressafra), sendo possível manter a cultura de cobertura viva por até sete dias antes da semeadura da soja sem afetar a produtividade de grãos desta nas condições do Cerrado do Maranhão. No entanto, o corte antecipado da cultura promove uma incorporação mais eficiente de carbono na biomassa microbiana, aumentos dos teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no solo e dos teores foliares de P, K e Cu na soja. Os dados do presente estudo confirmam potencial do cultivo do capim-sudão como cultura de cobertura em sistema de cultivo de soja.

## Referências

ABDALLA, M.; HASTINGS, A.; CHENG, K.; YUE, Q.; CHADWICK, D.; ESPENBERG, M.; TRUU, J.; REES, R. M.; SMITH, P. A critical review of the

impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. **Global Change Biology**, v. 25, n. 8, p. 2530-2543, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14644>.

ALEF, K. Estimation of soil respiration. *In*: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Métodos in Applied Soil Microbiology and Biochemistry**. London: Academic Press, 1995. 576p.

ALONSO-AYUSO, M.; GABRIEL, J. L.; QUEMADA, M. The kill date as a management tool for cover cropping success. **PloS One**, v. 9, n. 10, p. e109587, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109587>.

AL-SOLAIMANI, S. G.; ALGHABARI, F.; IHSAN, M. Z.; FAHAD, S. Water deficit irrigation and nitrogen response of Sudan grass under arid land drip irrigation conditions. **Irrigation and Drainage**, v. 66, n. 3, p. 365-376, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/ird.2110>.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, 711–728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

AMORIM, S. P.; NASCIMENTO, D.; BOECHAT, C. L.; DUARTE, L. D. S. L.; ROCHA, C. B.; CARLOS, F. S. Grasses and legumes as cover crops affect microbial attributes in oxisol in the Cerrado (Savannah environment) in the northeast region. **Revista Caatinga**, v. 33, p. 31-42, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n104rc>.

APARECIDO, L. E. O.; DUTRA, A. F.; LORENÇONE, P. A.; ALCÂNTARA NETO, F.; LORENÇONE, J. A.; LEITE, M. R. L. Climate change in MATOPIBA region of Brazil: a study on climate extremes in agriculture. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 153, n. 1, p. 87-100, 2023a. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04509-x>.

APARECIDO, L. E. O.; MENESES, K. C.; LORENÇONE, P. A.; LORENÇONE, J. A.; MORAES, J. R. D. S. C. D.; ROLIM, G. S. Climate classification by Thornthwaite (1948) humidity index in future scenarios for Maranhão State, Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 25, n. 1, p. 855-878, 2023b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02082-9>.

ASHWORTH, A. J.; OWENS, P. R.; ALLEN, F. L. Long-term cropping systems management influences soil strength and nutrient cycling. **Geoderma**, v. 361, p. 114062, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114062>.

BAPTISTELLA, J. L. C.; ANDRADE, S. A. L.; FAVARIN, J. L.; MAZZAFERA, P. Urochloa in tropical agroecosystems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 119, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>.

BENDER, S. F.; WAGG, C.; HEIJDEN, M. G. V. D. An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. **Trends In Ecology & Evolution**, v. 31, n. 6, p. 440-452, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016>.

BETTIO, D. P.; ARAUJO, A. S. F.; BONIFACIO, A.; ARAUJO, F. F. D. Soil microbial biomass, organic C, and soybean physiology in integrated crop–

- livestock systems with different inputs. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 68, n. 7, p. 971-983, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1864341>.
- BITTON, G.; BEN, K. Biochemical tests for toxicity screening. In: BITTON, G.; DUTKA, B. J. **Toxicity testing using microorganisms**. CRC Press, 1986. p. 27-55.
- BLANCO-CANQUI, H.; JASA, P. J. Do grass and legume cover crops improve soil properties in the long term?. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, n. 4, p. 1181-1187, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2019.02.0055>.
- BLOSZIES, S. A.; REBERG-HORTON, S. C.; HEITMAN, J. L.; WOODLEY, A. L.; GROSSMAN, J. M.; HU, S. Legume cover crop type and termination method effects on labile soil carbon and nitrogen and aggregation. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 3, p. 1817-1832, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.21022>.
- BOLFE, É. L.; VICTÓRIA, D. D. C.; CONTINI, E.; BAYMA-SILVA, G.; SPINELLI-ARAUJO, L.; GOMES, D. MATOPIBA em crescimento agrícola Aspectos territoriais e socioeconômicos. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n. 4, p. 38-62, 2016.
- BRACEY, W. M.; SYKES, V. R.; YIN, X.; BATES, G. E.; BUTLER, D. M.; MCINTOSH, D. W.; WILLETTE, A. R. Forage yield, quality, and impact on subsequent cash crop of cover crops in an integrated forage/row crop system. **Agronomy**, v. 12, n. 5, p. 1214, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12051214>.
- BRITO, L. D. C. R.; SOUZA, H. A.; ARAÚJO NETO, R. B.; AZEVEDO, D. M. P.; SAGRILLO, E.; VOGADO, R. F.; CARVALHO, S. P.; FERREIRA, A. C. M.; CAVIGELLI, M. A. Improved soil fertility, plant nutrition and grain yield of soybean and millet following maize intercropped with forage grasses and crotalaria in the Brazilian savanna. **Crop and Pasture Science**, v. 74, n. 5, p. 438-448, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1071/CP22251>.
- CASIDA, L. E.; KLEIN, D. A.; SANTORO, T. Soil dehydrogenase activity. **Soil Science**, v. 98, n. 6, p. 371-376, 1964.
- CHEN, W.; HOITINK, H. A. J.; MADDEN, L. V. Microbial activity and biomass in container media for predicting suppressiveness to damping-off caused by *Pythium ultimum*. **Phytopathology**, v. 78, n. 11, p. 1447-1450, 1988.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim da safra de grãos**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 23 ago. 2024.
- CORDEIRO, C. F. S.; ECHER, F. R.; ARAUJO, F. F. Cover crops impact crops yields by improving microbiological activity and fertility in sandy soil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 3, p. 1968-1977, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00494-0>.
- COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BOSSOLANI, J. W.; CASTILHOS, A. M. D.; NASCIMENTO, C. A. C.; LIMA, C. G. R.; BONINI, C. S. B.; KURAMAE, E. E. Can palisade and Guinea grass sowing time in intercropping systems affect soybean yield and soil chemical

properties?. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 81, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00081>.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BOSSOLANI, J. W.; PASCOALOTO, I. M.; ROCHA, C. G.; BONINI, C. S. B.; CASTILHOS, A. M.; CALONEGO, J. C. Soybean yield and nutrition after tropical forage grasses. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 121, p. 31-49, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10157-2>

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; ULIAN, N. D. A.; COSTA, B. S.; PARIZ, C. M.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M. Acúmulo de nutrientes e tempo de decomposição da palhada de espécies forrageiras em função de épocas de semeadura. **Bioscience Journal**, v. 31, p. 818-829, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14393/BJ-v31n3a2015-22434>.

DENTON, S.; RAPER, T.; STEWART, S.; DODDS, D. Cover crop termination timings and methods effect on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) development and yield. **Crop, Forage & Turfgrass Management**, v. 9, n. 1, p. e20206, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/cft2.20206>.

DI RIENZO, J. A.; CASANOVES, M. G. F.; BALZARINI, L.; GONZÁLEZ, M.; TABLADA, C. W. R. 2020. **InfoStat**. Argentina: Universidad Nacional de Córdoba. Disponível em: <https://www.infostat.com.ar/index.php?mod=page&id=46&lang=en>. Acesso em: 1 de ago 2023.

DIAS, M. B. C.; COSTA, K. A. P.; SEVERIANO, E. C.; BILEGO, U. O.; FURTINI NETO, A. E.; ALMEIDA, D. P.; BRAND, S. C.; VILELA, L. Brachiaria and Panicum maximum in an integrated crop–livestock system and a second-crop maize system in succession with soybean. **The Journal of Agricultural Science**, v. 158, n. 3, p. 206-217, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859620000532>.

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 991-996, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000400026>.

FRANCHINI, J. C., BALBINOT JUNIOR, A. A., DEBIASI, H., CONTE, O. Desempenho da soja em consequência de manejo de pastagem, época de dessecação e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 1131-1138, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001200002>.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Oxidação do enxofre elementar em solos tropicais. **Ciência Rural**, v. 36, p. 822-828, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000300015>.

ISMAIL, S. M.; EL-NAKHLAWY, F. S.; BASAHI, J. M. Sudan grass and pearl millets productivity under different irrigation methods with fully irrigation and stresses in arid regions. **Grassland Science**, v. 64, n. 1, p. 29-39, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/grs.12179>.

JAHANZAD, E.; BARKER, A. V.; HASHEMI, M.; EATON, T.; SADEGHPOUR, A.; WEIS, S. A. Nitrogen release dynamics and decomposition of buried and surface cover crop residues. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1735-1741, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2016.01.0001>.

LIEBERT, J.; MIRSKY, S. B.; PELZER, C. J.; RYAN, M. R. Optimizing organic no-till planted soybean with cover crop selection and termination timing. **Agronomy Journal**, v. 115, n. 4, p. 1938-1956, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.21390>.

MAZZUCHELLI, R. C. L.; ARAÚJO, A. S. F.; MORO, E.; ARAÚJO, F. Changes in soil properties and crop yield as a function of early desiccation of pastures. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 840-848, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00169-x>.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MURAOKA, T.; CARMO, C. A. F. S. do; MELO, W. J. Análise química de tecido vegetal. *In*: SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2009. p. 191-234

NASCENTE, A. S.; CRUSCIOL, C. A. C.; COBUCCI, T. The no-tillage system and cover crops—Alternatives to increase upland rice yields. **European Journal of Agronomy**, v. 45, p. 124-131, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.09.004>.

NIEMAN, C. C.; ALBRECHT, K. A.; SCHAEFER, D. M. Corn and sudangrass intercropped with Kura clover for Midwestern pastures. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 4, p. 2905-2915, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20244>.

OLIVEIRA JÚNIOR, A.; CASTRO, C.; OIVEIRA, F. A.; KLEPKER, D. Fertilidade do solo e estado nutricional da soja. *In*: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JÚNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. C. (Eds.). **Tecnologias de Produção de Soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020, p. 133-184.

OTTE, B.; MIRSKY, S.; SCHOMBERG, H.; DAVIS, B.; TULLY, K. Effect of cover crop termination timing on pools and fluxes of inorganic nitrogen in no-till corn. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2832-2842, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0699>.

PIRES, G. C.; DENARDIN, L. G. O.; SILVA, L. S.; FREITAS, C. M.; GONÇALVES, E. C.; CAMARGO, T. A.; BREMM, C.; CARVALHO, P. C. F.; SOUZA, E. D. System fertilization increases soybean yield through soil quality improvements in integrated crop-livestock system in tropical soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 4, p. 4487-4495, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-022-01050-0>.

POUDEL, P.; PARAJULI, B.; PARK, D.; YE, R. Cover Crop Residues Decomposition and Nutrient Releases in a Sandy Ultisols of US Coastal Plain: Impacts of Termination Timing. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 54, n. 17, p. 2394-2411, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2023.2223612>.

QIN, Z.; GUAN, K.; ZHOU, W.; PENG, B.; VILLAMIL, M. B.; JIN, Z.; TANG, J.; GRANT, R.; GENTRY, L.; MARGENOT, A. J.; BOLLERO, G.; LI, Z. Assessing the impacts of cover crops on maize and soybean yield in the US Midwestern agroecosystems. **Field Crops Research**, v. 273, p. 108264, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108264>.

RAUSCH, L. L.; GIBBS, H. K.; SCHELLY, I.; BRANDÃO JUNIOR, A.; MORTON, D. C.; CARNEIRO FILHO, A.; STRASSBURG, B.; WALKER, N.; NOOJIPADY, P.; BARRETO, P.; MEYER, D. Soy expansion in Brazil's Cerrado. **Conservation Letters**, v. 12, n. 6, p. e12671, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/conl.12671>.

ROSA, A. T.; CREECH, C. F.; ELMORE, R. W., RUDNICK, D. R., LINDQUIST, J. L.; FUDOLIG, M.; BUTTS, L.; WERLE, R. Implications of cover crop planting and termination timing on rainfed maize production in semi-arid cropping systems. **Field Crops Research**, v. 271, p. 108251, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108251>.

RUIS, S. J.; BLANCO-CANQUI, H. Cover crops could offset crop residue removal effects on soil carbon and other properties: A review. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 5, p. 1785-1805, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2016.12.0735>.

RUIS, S. J.; BLANCO-CANQUI, H.; KOEHLER-COLE, K.; JASA, P. J.; SLATER, G.; ELMORE, R. W.; FERGUSON, R. B. Winter cover crop root biomass yield in corn and soybean systems. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 3, n. 1, p. e20101, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agg2.20101>.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 356 p.

SANTOS, S. F. D. C. B.; SOUZA, H. A.; ARAÚJO NETO, R. B.; SAGRILO, E.; FERREIRA, A. C. M.; CARVALHO, S. P.; BRITO, L. C. R.; LEITE, L. F. C. Soil Microbiological Attributes and Soybean Grain Yield in Succession to Corn Intercropped with Forage in the Maranhão Eastern Cerrado. **International Journal of Plant Production**, v. 15, n. 4, p. 669-677, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-021-00167-z>.

SCHNURER, J.; ROSSWALL, T. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 43, n. 6, p. 1256-1261, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.43.6.1256-1261.1982>.

SILVA, A. D. N.; RIBEIRO JUNIOR, W. Q.; RAMOS, M. L. G.; LIMA, C. A.; JAYME-OLIVEIRA, A.; SILVA, A. M. M.; CARVALHO, A. M. Nutrient accumulation in cover crops under contrasting water regimes in the Brazilian cerrado. **Atmosphere**, v. 13, n. 10, p. 1617, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13101617>.

SILVA, D. S.; ARIMA, E. Y.; REIS, T. N.; RATTIS, L. Temperature effect on Brazilian soybean yields, and farmers' responses. **International Journal of**

**Agricultural Sustainability**, v. 21, n. 1, p. 2173370, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/14735903.2023.2173370>.

SILVA, D.; QUEIROZ, A. C. **Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos**. Viçosa: UFV. 2006. 235 p.

SILVA, E. E.; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. **Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C)**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007. 6 p.

SILVA, J. A. G.; COSTA, K. A. P.; SEVERIANO, E. C.; SILVA, A. G.; VILELA, L.; LEANDRO, W. M.; MUNIZ, M. P.; SILVA, L. M.; MENDONÇA, K. T. M.; BARROS, V. M. Efficiency of desiccation, decomposition and release of nutrients in the biomass of forage plants of the genus brachiaria after intercropping with sorghum in integrated systems for soybean productivity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 55, n. 11, p. 1644-1662, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2024.2323076>

Soil Survey Staff. **Keys to Soil Taxonomy**, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 2014.

SOUSA, R. N.; SILVA, B. A.; COSTA, V. V.; TEIXEIRA, R. S.; VALADARES, S. V.; SILVA, I. R.; VENEGAS, V. H. A.; VERGUTZ, L. Limestone and phosphogypsum are key drivers of eucalypt production in the highly weathered soils of Brazil. **Plant and Soil**, v. 496, n. 1, p. 221-241, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05801-x>.

SOUZA, V. S.; SANTOS, D. D. C.; FERREIRA, J. G.; DE SOUZA, S. O.; GONÇALO, T. P.; DE SOUSA, J. V. A.; CRUVINEL, A. G.; VILELA, L.; PAIM, T. P.; ALMEIDA, R. E. M.; CANISARES, L. P.; CHERUBIN, M. R. Cover crop diversity for sustainable agriculture: Insights from the Cerrado biome. **Soil Use and Management**, v. 40, n. 1, p. e13014, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.13014>.

SPARLING, G. P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Australian Journal of Soil Research**, v. 30, p. 195–207, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR9920195>.

TANAKA, K. S.; CRUSCIOL, C. A.; SORATTO, R. P.; MOMESSO, L.; COSTA, C. H.; FRANZLUEBBERS, A. J.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; CALONEGO, J. C. Nutrients released by Urochloa cover crops prior to soybean. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 113, p. 267-281, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-019-09980-5>.

TEDESCO, M.; GIANELLO, G.; BISSANI, C.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. **Análises de Solo, Plantas e Outros Materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 574 p.

THAPA, R.; TULLY, K. L.; REBERG-HORTON, C.; CABRERA, M.; DAVIS, B. W.; FLEISHER, D.; GASKIN, J.; HITCHCOCK, R.; PONCET, A.; CHOMBERG, H. H.; SEEHAVER, S. A.; TIMLIN, D.; MIRSKY, S. B. Cover crop residue

decomposition in no-till cropping systems: Insights from multi-state on-farm litter bag studies. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 326, p. 107823, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107823>.

THAPA, R.; TULLY, K. L.; REBERG-HORTON, C.; CABRERA, M.; DAVIS, B. W.; FLEISHER, D.; GASKIM, J.; HITCHOCK, R.; POCENT, A.; SCHOMBERG, H. H.; SEEHAVER, S. A.; TIMLIN, D.; MIRSKY, S. B. Cover crop residue decomposition in no-till cropping systems: Insights from multi-state on-farm litter bag studies. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 326, p. 107823, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107823>.

USDA - United States Department of Agriculture. **World Agricultural Production**. Disponível em:

<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf.ANO?>. Acesso em: 1 de ago 2024.

VAN SOEST, P. J.; ROBERTISON, J. B.; LEWIS, B. A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of Dairy Science**, v. 74, p. 3583-3597, 1991. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2).

WEIDHUNER, A.; AFSHAR, R. K.; LUO, Y.; BATTAGLIA, M.; SADEGHPOUR, A. Particle size affects nitrogen and carbon estimate of a wheat cover crop. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 3398-3402, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0164>.

WERNER, F.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FERREIRA, A. S.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SILVA, M. A. D. A. Performance of soybean crop in response to palisadegrass pasture desiccation and nitrogen fertilization under integrated crop-livestock system. **Australian Journal of Crop Science**, v. 16, n. 6, p. 850-855, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.06.p3644>.

WERNER, F.; FERREIRA, A. S.; BALBINOT-JUNIOR, A. A.; OLIVEIRA-JUNIOR, A. O.; DEBIASI, H.; SILVA, M. A. A. Nitrogen, phosphorus, and potassium released by decomposition of palisade grass to soybean in succession. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, p. e01853, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01853>.

WORTMAN, S. E.; FRANCIS, C. A.; BERNARDS, M. L.; DRIJBER, R. A.; LINDQUIST, J. L. Optimizing cover crop benefits with diverse mixtures and an alternative termination method. **Agronomy journal**, v. 104, n. 5, p. 1425-1435, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0185>.

XIE, H.; HUANG, Y.; CHOI, Y.; SHI, J. Evaluating the sustainable intensification of cultivated land use based on emergy analysis. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 165, p. 120449, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120449>.

ZIKI, S. J. L.; ZEIDAN, E. M. I.; EL-BANNA, A. Y. A.; OMAR, A. E. Influence of cutting date and nitrogen fertilizer levels on growth, forage yield, and quality of sudan grass in a semiarid environment. **International Journal of Agronomy**, v. 2019, n. 1, p. 6972639, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/6972639>.

### **CAPÍTULO III – Correção do solo em sistema de cultivo da soja em área de fronteira agrícola do Nordeste do Brasil**

#### **Resumo**

As condições climáticas e o período entre a aplicação do calcário e o cultivo da soja limitam a eficiência da dose convencional de calcário na correção da acidez do solo em áreas de fronteira agrícola do Cerrado brasileiro. O objetivo foi avaliar doses elevadas de calcário com gesso nas mudanças da fertilidade do solo, nutrição e produtividade da soja/culturas de cobertura. O estudo foi desenvolvido entre 2021 a 2024 na fazenda Barbosa, em Brejo, Maranhão, Brasil. O delineamento consistiu em blocos casualizados com parcelas subdivididas. As parcelas correspondem ao tratamento sem ou com gesso e as subparcelas, a cinco doses de calcário: 3 (dose convencional), 4, 6, 8 e 10 t ha<sup>-1</sup>. O calcário e o gesso foram aplicados a lanço e incorporados com grade de 36". Amostras de solo e folhas da soja foram coletadas para determinar a fertilidade do solo e estado nutricional da soja. A produtividade da soja e das culturas na entressafra foi quantificada. Quando constatado efeito significativo do fator gesso, os dados foram comparados pelo teste t. Análise de regressão foi utilizada quando constatado efeito significativo do fator calcário e sua interação com gesso. O aumento das doses de calcário proporcionou maior quantidade efetiva de calcário reagido e menor taxa de reação do calcário. Por isto, doses elevadas reduzem os componentes da acidez do solo, melhoraram a qualidade química do solo e mitigam a retomada da acidez. Doses elevadas de calcário aumentaram a fração P ligado ao Ca (P-Ca), mas não afetaram negativamente o teor foliar de P na soja. O gesso afetou a disponibilidade de K no solo e o seu teor na soja. A produtividade da soja não apresentou resposta positiva ao aporte de gesso, diferente do milheto, cuja produtividade aumentou com a aplicação deste insumo. Houve uma tendência de estabilização da produtividade acumulada da soja a partir da dose de 6 t ha<sup>-1</sup> de calcário. Conclui-se que o uso de doses elevadas de calcário é crucial para construir a fertilidade do solo, melhorar a nutrição da soja e aumentar a produtividade soja/plantas de cobertura em uma área de fronteira agrícola do Cerrado brasileiro.

**Palavras-chave:** Acidez do solo, calcário, fertilidade do solo, gesso agrícola.

### **CHAPTER III – Recommendation for soil correction in soybean cultivation systems in the agricultural frontier area of Northeastern Brazil**

#### **Abstract**

Climatic conditions and the period between limestone application and soybean cultivation limit the efficiency of conventional limestone doses in correcting soil acidity in agricultural frontier areas of the Brazilian Cerrado. The objective was to evaluate high doses of limestone with gypsum on changes in soil fertility, nutrition, and productivity of soybean/cover crops. The study was developed between 2021 and 2024 at the Barbosa farm, in Brejo, Maranhão, Brazil. The design consisted of randomized blocks with subdivided plots. The plots correspond to the treatment without or with gypsum and the subplots, to five limestone doses: 3 (conventional dose), 4, 6, 8, and 10 t ha<sup>-1</sup>. Limestone and gypsum were broadcast and incorporated with a 36" harrow. Soil and soybean leaf samples were collected to determine soil fertility and soybean nutritional status. Soybean and crop productivity in the off-season was quantified. When a significant effect of the gypsum factor was found, the data were compared using the t-test. Regression analysis was used when a significant effect of the limestone factor and its interaction with gypsum was found. Increasing the limestone doses provided a greater effective amount of reacted limestone and a lower limestone reaction rate. Therefore, high doses reduce the components of soil acidity, improve soil chemical quality and mitigate the resumption of acidity. High doses of limestone increased the P fraction bound to Ca (P–Ca), but did not negatively affect the foliar P content of soybeans. Gypsum affected the availability of K in the soil and its content in soybeans. Soybean productivity did not show a positive response to gypsum input, unlike millet, whose productivity increased with the application of this input. There was a tendency for the accumulated productivity of soybeans to stabilize after the 6 t ha<sup>-1</sup> limestone dose. It is concluded that the use of high doses of limestone is crucial to build soil fertility, improve soybean nutrition and increase soybean/cover crop productivity in an agricultural frontier area of the Brazilian Cerrado.

**Keywords:** Soil acidity, limestone, soil fertility, agricultural gypsum.

## 1 Introdução

O crescente aumento do consumo mundial de carne e grãos aliado a expansão das terras agrícolas (Tiritan *et al.*, 2016) consagrou o Brasil como o principal produtor mundial de soja, com produção de 147 milhões de toneladas (Conab, 2024). Este cenário surge após a expansão do cultivo da soja na fronteira agrícola do bioma Cerrado, denominada de MATOPIBA, que compreende os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (Araújo *et al.*, 2019; Araújo *et al.*, 2024). Dentre esses estados, o Maranhão contribui com uma área de 33% (Miranda *et al.*, 2014), sendo 1,3 milhões de hectares destinados para a produção da soja (Conab, 2024). Estima-se ainda, que até 2050, possa ocorrer uma conversão de 520.000 hectares de vegetação nativa do Cerrado do Maranhão para integrar a produção agrícola (Ferreira *et al.*, 2013).

Uma problemática para atingir altos patamares produtivos da soja em área recentemente convertida para a produção agrícola constitui a baixa fertilidade natural do solo do Cerrado. Os solos são intemperizados, com baixos níveis de nutrientes e níveis tóxicos de alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) e manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ ) (Besen *et al.*, 2021; Bolan *et al.*, 2023). Além disso, a baixa disponibilidade de fósforo (P) é preocupante devido à predominância dos processos de adsorção ou precipitação do P com óxidos de ferro (Fe) e  $\text{Al}^{3+}$ , tornando-o o nutriente mais limitante na agricultura (Fink *et al.*, 2016; Alovisei *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021). Neste contexto, os efeitos deletérios da acidez são corrigidos através da aplicação do calcário agrícola (Deus *et al.*, 2020; Bossolani *et al.*, 2021). Embora o calcário seja amplamente difundido, algumas lacunas para otimização do seu uso ainda permanecem.

O Maranhão apresenta período da estação chuvosa estreito (Aparecido *et al.*, 2023). Nesta região, a soja é uma cultura de sequeiro, portanto sugere-se que a semeadura ocorra em concomitância com início do período chuvoso (Reis *et al.*, 2020), que também coincide com o período de aplicação do calcário. O calcário é um corretivo de baixa solubilidade, por isto, a neutralização da acidez e a saturação por bases adequada pode não ser alcançada no curto prazo. Existem fatores que impulsionam a eficiência da correção da acidez do solo, como condições climáticas, tempo após a aplicação e a dose (Crusciol *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2018a; Vargas *et al.*, 2019). Deste modo, doses elevadas de

calcário no cultivo podem ser uma estratégia eficiente para atenuar a acidez do solo, aumentar a saturação por bases, prolongar o efeito residual (Minato *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2024) e disponibilizar o P ligado as frações Fe (P–Fe) e/ou Al (P–Al) (Matelele *et al.*, 2024) quando as condições climáticas e o tempo após a aplicação são um empecilho. Entretanto, há a preocupação de que a solubilidade do P possa diminuir com doses elevadas de calcário devido, à formação da fração P ligado ao cálcio (P–Ca) (Firmano *et al.*, 2021; Weng *et al.*, 2021).

Além disso, a baixa mobilidade do calcário no perfil pode aliviar a acidez superficial do solo, enquanto camadas mais profundas permanecem com níveis tóxicos de  $Al^{3+}$ , prejudicial para a absorção de água e nutrientes pela soja (Reis *et al.*, 2018). Esta condição pode ocasionar declínio na produtividade da soja, sobretudo quando combinado com período de seca (Tiecher *et al.*, 2018; Pias *et al.*, 2020), como ocorre geralmente em região tropical. Por este motivo, efeitos positivos com o uso do gesso agrícola são esperados, pois a alta solubilidade deste pode diminuir a saturação por  $Al^{3+}$  com celeridade e aumentar a concentração de cálcio ( $Ca^{+2}$ ) e enxofre ( $S-SO_4^{2-}$ ) em subsuperfície (Vicensi *et al.*, 2020; Besen *et al.*, 2021). Embora o gesso seja amplamente usado, seus efeitos em área de primeiro ano agrícola com baixa fertilidade associado com elevadas doses de calcário carecem de elucidação, principalmente quanto à possibilidade de lixiviação de magnésio ( $Mg^{2+}$ ) e potássio (K) (Umburanas *et al.*, 2023).

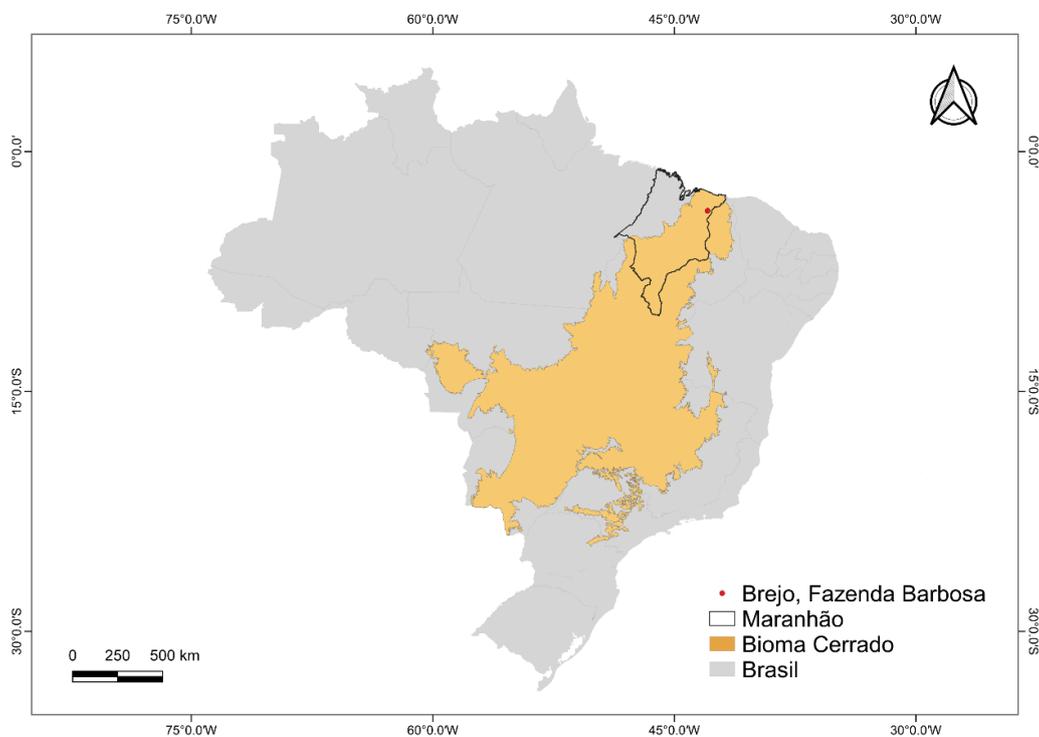
Por este motivo, compreender estratégias de manejo sustentável pode auxiliar na construção da fertilidade do solo em novas áreas de exploração agrícola. Este estudo, foi conduzido para testar as seguintes hipóteses: i) doses convencionais de calcário não atenuam eficientemente a acidez do solo e não atingem a saturação por bases adequada para a conversão de área de vegetação nativa para sistemas de produção intensivos, enquanto doses elevadas de calcário aceleram as taxas de reações, promovem melhorias nas propriedades químicas do solo e prolongam o efeito residual do calcário nas condições climáticas da fronteira agrícola ii) elevadas doses de calcário diminui a fração P–Fe/Al e aumentam a solubilidade do P, mas aumenta a proporção da fração P–Ca; iii) em curto prazo, o gesso neutraliza a acidez no perfil do solo com maior eficácia e quando combinando com elevadas doses de calcário

melhora as propriedades químicas subsuperficiais do solo, nutrição e produtividade das culturas em sistemas intensivos em área de expansão agrícola. O objetivo foi avaliar os efeitos de doses elevadas de calcário com gesso na dinâmica das mudanças das propriedades químicas do solo, nutrição e produtividade sob sistema de cultivo de soja/plantas de cobertura.

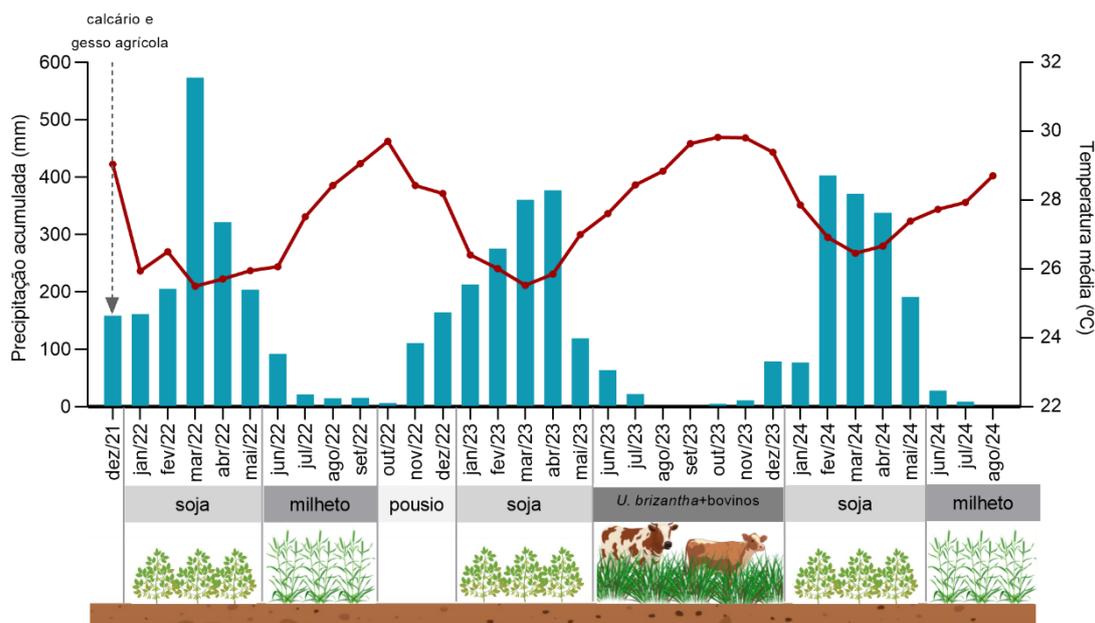
## 2 Material e Métodos

### 2.1 Local experimental

O estudo foi desenvolvido entre dezembro de 2021 a agosto de 2024, na fazenda Barbosa, localizada no município de Brejo, estado do Maranhão, Brasil ( $3^{\circ}42'58''$  e  $42^{\circ}55'40''$  W, 105 m de altitude) (Figura 1). O clima da região é classificado como Aw, ou seja, apresenta inverno seco e verão chuvoso, de acordo com Köppen (1936) (Alvares *et al.*, 2013). A temperatura média e a precipitação acumulada foram coletadas mensalmente durante o período do estudo (Figura 2).



**Figura 1** Localização geográfica do local experimental. Brejo, Maranhão, Brasil.



**Figura 2** Temperatura média do ar e precipitação pluviométrica acumulada. Representação esquemática dos sistemas de cultivo durante o período do estudo, entre dezembro de 2021 a agosto de 2024. Brejo, Maranhão, Brasil. Fonte: *Climate Engine*.

O solo é classificado como Argissolo Amarelo, de acordo com o Sistema Brasileira de Classificação dos Solos (Santos *et al.*, 2018b), correspondente ao *Ultisol* (Soil Taxonomy). Antes da instalação do experimento, foram realizadas caracterizações químicas e granulométrica do solo (Raij *et al.*, 2001; Teixeira *et al.*, 2017) utilizando amostras coletadas em profundidades de 0,0 a 0,6 m em intervalos de 0,2 m (Tabela 1).

**Tabela 1** Atributos químicos e caracterização da granulometria do solo antes do experimento.

Atributos	Profundidade (m)		
	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6
pH <sub>CaCl2</sub>	5,35	5,26	4,97
COT (g kg <sup>-1</sup> )	22	13	9
P (mg dm <sup>-3</sup> )	5,0	1,4	1,5
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,05	0,02	0,02
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,24	0,77	0,15
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,66	0,28	0,28
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,20	0,53	0,98
S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg dm <sup>-3</sup> )	1,77	1,18	1,67
B (mg dm <sup>-3</sup> )	0,21	0,21	0,21
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,04	0,04	0,08
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	70	119	165

Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	0,46	0,10	0,11
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	0,39	0,28	0,33
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5,92	5,95	5,53
CTC (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	7,86	7,01	5,98
V (%)	25	15	8
m (%)	9	33	68
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	168	215	269
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	159	128	153
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	673	657	578

pH em CaCl<sub>2</sub> = potencial hidrogeniônico; COT = carbono orgânico total; P = fósforo; K<sup>+</sup> = potássio; Ca<sup>+2</sup> = cálcio; Mg<sup>+2</sup> = magnésio; Al<sup>+3</sup> = alumínio; S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> = enxofre; B = boro; Cu = cobre; Fe = ferro; Mn = manganês; Zn = zinco; H+Al = acidez potencial; CTC = capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases; e m = saturação por alumínio.

## 2.2 Projeto experimental

Foi estabelecido um estudo de campo em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições em esquema de parcelas subdivididas organizadas com arranjo fatorial de 2 x 5. As parcelas correspondem aos tratamentos sem ou com gesso. Nas subparcelas foram aplicadas cinco doses de calcário, sendo estas: 3, 4, 6, 8 e 10 t ha<sup>-1</sup>, que correspondem a 59, 70, 92, 115 e 137% da saturação por bases almejada. O calcário aplicado apresentava poder relativo de neutralização total de 88%, com teores de CaO e MgO de 29,6 e 16,6%, respectivamente. A dose de 3 t ha<sup>-1</sup> consiste na quantidade de calcário comumente aportada ao solo por agricultores da região. No tratamento com gesso, foi aplicado 1 t ha<sup>-1</sup> do insumo, conforme recomendado por Sousa e Lobato (2004). O gesso agrícola era constituído por 21,2% de Ca e 15,5% de S. As parcelas sem ou com gesso apresentavam dimensão de 80 x 40 m. As subparcelas que receberam o calcário apresentavam dimensões de 16 x 10 m.

## 2.3 Manejo das culturas

Em dezembro de 2021, após a remoção a vegetação nativa, o calcário foi aplicado a lanço e incorporado com grade de 36". Em seguida, o gesso também foi aplicado seguindo o mesmo procedimento. A semeadura da soja ocorreu 20 dias após a aplicação dos corretivos, em janeiro de 2022. Neste ano, foi semeada a soja PP9510 IPRO em um espaçamento de 0,5 m entre fileiras e população de 296.000 plantas ha<sup>-1</sup>. Antecipadamente à semeadura, foi aplicado

100 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio (60% de K<sub>2</sub>O) e 150 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato monoamônico (52% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 11% de N e 9% de S) na linha de plantio. Ainda na semeadura, foram aplicados 400 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples (18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 16% Ca e 10% S) e 40 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante MIB (3,0% de S, 2,5% de B, 1,0% de Cu, 0,1% de Mo, 10% de Mn e 7,0% de Zn). Em cobertura, foram aplicados 200 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 10-00-30, formulado a partir do cloreto de potássio e sulfato de amônio (20% de N e 24% de S). Em subsequência à colheita da soja, foi semeado o milho cv. ADR300 no inverno seco a lanço, com taxa de semeadura de 20 kg ha<sup>-1</sup> de sementes.

Em janeiro de 2023, foi semeada a soja HO Mamoré IPRO em um espaçamento de 0,5 m entre fileiras e população de 256.000 plantas ha<sup>-1</sup>. Foi realizada uma adubação antecipada com 100 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio e 125 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 09-46-00. Em cobertura, foi aplicado 200 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 10-00-30. Após a colheita da soja, foi semeada em junho de 2023, sementes de *Urochloa brizantha* cv. Marandu a lanço, com taxa de semeadura de 6,5 kg ha<sup>-1</sup> de sementes. A entrada dos animais ocorreu 165 dias após a semeadura do *U. brizantha*. A taxa de lotação correspondeu 5 UA ha<sup>-1</sup> por 55 dias. Logo após a retirada dos animais, a pastagem remanescente foi dessecada com a aplicação de 5 L ha<sup>-1</sup> do herbicida glifosato.

Em janeiro de 2024 foi semeada a soja PP Brutus IPRO em um espaçamento de 0,5 m entre fileiras e população de 320.000 plantas ha<sup>-1</sup>. Antecipadamente foi aplicado 100 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio. No plantio, foi aplicado 130 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 10-46-00. Em cobertura aplicou-se 200 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 10-00-30. Após a colheita da soja, em junho de 2024, procedeu-se à semeadura a lanço de 20 kg ha<sup>-1</sup> de sementes de milho cv. ADR300.

#### **2.4 Análise do estado nutricional**

O estado nutricional da soja foi avaliado em pleno florescimento (R2) nas safras agrícolas 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024. Em cada parcela, oito folhas recém expandidas com pecíolo foram coletadas do terceiro trifólio a partir do ápice da planta (Oliveira Junior, 2013). As amostras foram lavadas com água, ácido clorídrico a 3% e água deionizada (v:v), respectivamente. As amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas. Após a

secagem, o material foi moído em moinho tipo Willey. As amostras vegetais foram submetidas à digestão sulfúrica, seguida de destilação pelo método de Kjeldahl e titulação para a determinação do nitrogênio (N). O boro (B) foi determinado pelo método da azometina-H após incineração das amostras em mufla com posterior quantificação no espectrofotômetro. O cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P), enxofre (S), ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn) foram determinados em espectroscopia de absorção atômica após digestão nítricapercloreica. Os procedimentos estão descritos em Miyazawa *et al.* (2009).

## 2.5 Análise química do solo

O solo para análises químicas foi coletado na maturação plena da soja (R8) nas safras agrícolas 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024. Quatro amostras simples nas linhas e entrelinhas de plantio, foram coletadas na profundidade de 0,0–0,2, 0,2–0,4 e 0,4–0,6 m do solo e agrupadas em uma amostra composta, por profundidade e por parcela.

O pH do solo foi medido em suspensão de  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  (1:2,5 solo/solução, v/v). O K e o P disponíveis foram extraídos com solução Mehlich-1, sendo a concentração de K determinada por espectroscopia de absorção atômica e a concentração de P por espectrofotometria. O  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e o  $\text{Al}^{+3}$  trocáveis foram determinados por espectroscopia de absorção atômica após extração com  $\text{KCl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ , sendo que o  $\text{Ca}^{+2}$  e o  $\text{Mg}^{+2}$  foram determinados por espectroscopia de absorção atômica, enquanto que o  $\text{Al}^{+3}$ , por titulação de neutralização com solução de  $\text{NaOH}$  padronizado. O  $\text{S-SO}_4^{2-}$  foi quantificado com o uso de  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  em solução acética  $2 \text{ mol L}^{-1}$  e leitura por turbidimetria em espectrofotômetro após agitação com cloreto de bário. O Zn, Cu, Fe e Mn extraíveis foram determinados com solução Mehlich-1 e mensurados em espectroscopia de absorção atômica. O B extraível foi quantificado por espectrofotometria a partir do uso do método de extração com água quente. A acidez potencial em pH 7,0 (H+Al) foi extraída com solução de acetado de cálcio ( $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ) e determinada por titulação com solução de  $\text{NaOH}$   $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$  (Raij *et al.*, 2001; Teixeira *et al.*, 2017). A soma de bases (SB) foi obtida pela soma dos cátions  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{K}^+$ . A capacidade de troca catiônica

em pH 7,0 ( $CTC_{pH7,0}$ ) foi calculada por  $SB + (H + Al)$ . A saturação por bases (V) foi calculada pela relação:  $V = 100 \times SB/CTC_{pH7,0}$ . A saturação por alumínio (m) foi obtido pela relação:  $m = [Al/(SB + Al)] \times 100$ .

Foi quantificado o Ca não trocável (Ca-NT), Mg não trocável (Mg-NT) e Ca+Mg não trocáveis (Ca+Mg-NT) na profundidade de 0,0–0,2 m do solo, com método proposto por Raij *et al.* (1982), Quaggio *et al.* (1995) e Soratto e Crusciol (2008). Após a extração do  $Ca^{+2}$  e do  $Mg^{+2}$  trocáveis, a solução foi filtrada e o solo retido no papel filtro foi lavado duas vezes com água fervente, sendo este processo realizado com auxílio de vácuo. Na última lavagem, o solo retido foi transferido para um bécker com 20 ml de HCl 0,5 M e, em seguida, fervido por 5 minutos. A solução do solo foi novamente filtrada para um balão volumétrico completado para o volume de 100 ml. Após este processo, 0,2 ml do extrato foi pipetado e adicionado 5,0 ml de solução de lantânico 0,3% e 4,8 ml de água destilada. O Ca e Mg NT foram determinados no espectrofotômetro de absorção atômica. Com a concentração de Ca+Mg-NT, foi calculado o corretivo residual, ou seja, a fração de corretivo que ainda não reagiu no solo (CNR). Para isto, foi determinado a testemunha, oriunda do solo que não recebeu calcário, com o intuito de determinar somente o Ca e o Mg não trocáveis provenientes do calcário. Como testemunha, foi considerado solo da mata nativa, próximo ao local do estudo.

Na profundidade de 0,0–0,2 m do solo também foi realizado o fracionamento inorgânico do P. A fração P-Al foi extraída com  $NH_4F$  0,5 mol  $L^{-1}$  em pH 8,2, a fração P-Fe com NaOH 0,1 mol  $L^{-1}$ , enquanto que para a fração P-Ca foi usado  $H_2SO_4$  0,5 mol  $L^{-1}$  (Chang e Jackson, 1957). As frações de P nos extratos foram determinadas pelo método colorimétrico do ácido ascórbico a 680 nm, utilizando um espectrofotômetro (Murphy e Riley, 1962).

## 2.6 Análise de produtividade

No estágio fenológico de maturação plena da soja (R8), a produtividade foi estimada com ajuste do peso seco a 13% de umidade após a colheita dos grãos na área útil central de cada subparcela (2,0  $m^2$ ). De modo similar, os grãos do milho foram colhidos durante a maturação em uma área útil de 2,0  $m^2$ . A produtividade foi mensurada após a pesagem dos grãos colhidos. A umidade

dos grãos foi corrigida a 13%. A produtividade do *U. brizantha* foi determinada antes do pastejo dos animais, através da colheita da parte aérea da forragem a 10 cm acima do nível do solo em uma área de 1,0 m<sup>2</sup>, determinada com o auxílio de uma moldura. Após a coleta, a massa da forragem foi seca em estufa a 65 °C por 72 horas e posteriormente pesada.

## 2.7 Análise estatística

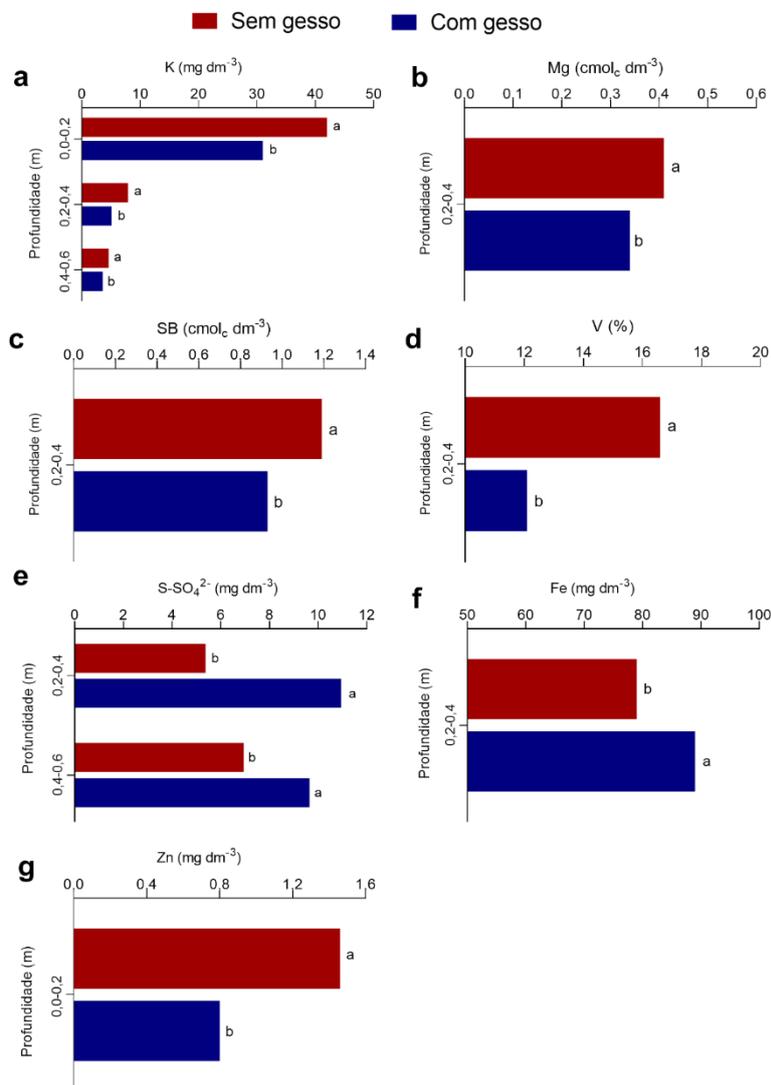
A normalidade dos resíduos em todos os conjuntos de dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilks ( $p < 0,05$ ) e, quando não satisfeita a condição, os dados foram transformados. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F ( $p < 0,05$ ), para verificar efeito das doses de calcário, do gesso e da interação entre ambos sobre as variáveis avaliadas. Quando constatado efeito significativo ( $p < 0,05$ ) para o fator gesso, as médias foram comparadas entre si pelo teste t. Quando verificado efeito significativo ( $p \leq 0,05$ ) para as doses de calcário e a interação entre os fatores, a análise de regressão foi aplicada, conforme o ajuste a modelos matemáticos ( $p < 0,05$ ). As análises foram realizadas no programa estatístico Sisvar versão 5.8 (Ferreira, 2019).

## 3 Resultados

### 3.1 Atributos químicos do solo

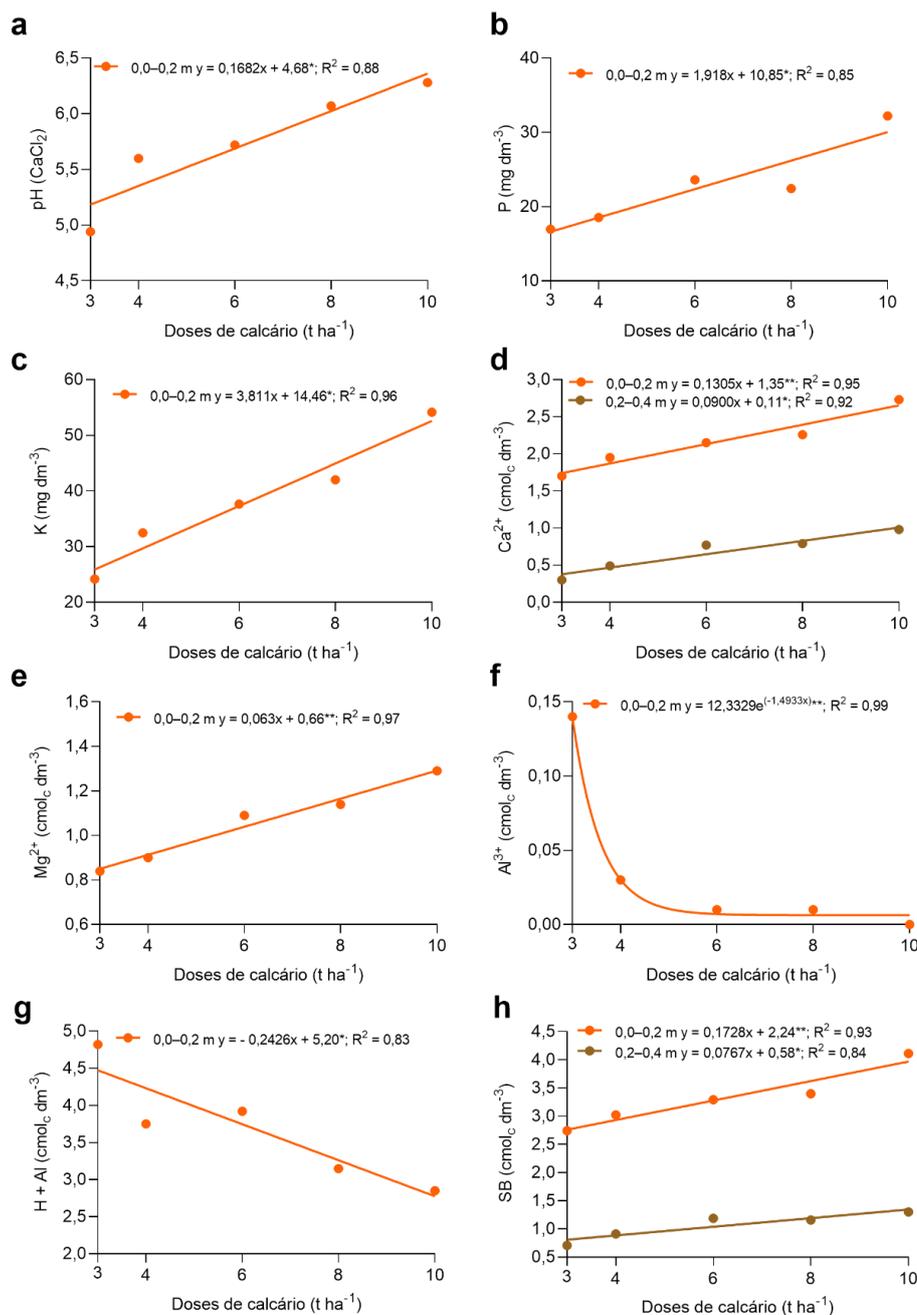
As doses de calcário e o gesso agrícola promoveram mudanças significativas ( $p < 0,05$ ) na fertilidade do solo no primeiro (Apêndice 1), segundo (Apêndice 2) e terceiro (Apêndice 3) ano agrícola. Na safra 2021/2022, o gesso diminuiu em 26, 35 e 22% a disponibilidade de K na profundidade de 0,0–0,2, 0,2–0,4 e 0,4–0,6 m, respectivamente (Figura 3a). Houve redução de 27% da disponibilidade de Mg<sup>2+</sup> com o gesso, na profundidade 0,2–0,4 m (Figura 3b). Nesta mesma profundidade, a diminuição de K e Mg<sup>2+</sup> afetou negativamente a SB (Figura 3c) e V (Figura 3d). Contudo, o aporte do gesso aumentou em 51 e 29% a concentração de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> na profundidade de 0,2–0,4 e 0,4–0,6 m, respectivamente (Figura 3e). O gesso diminuiu a disponibilidade de Fe (Figura

3f) em subsuperfície, mas aumentou a disponibilidade de Zn (Figura 3g) em superfície.



**Figura 3** Concentração de K (a), Mg<sup>2+</sup> (b), SB (c), V (d), S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (e), Fe (f) e Zn (g) do solo em resposta ao gesso agrícola na safra agrícola 2021/2022.

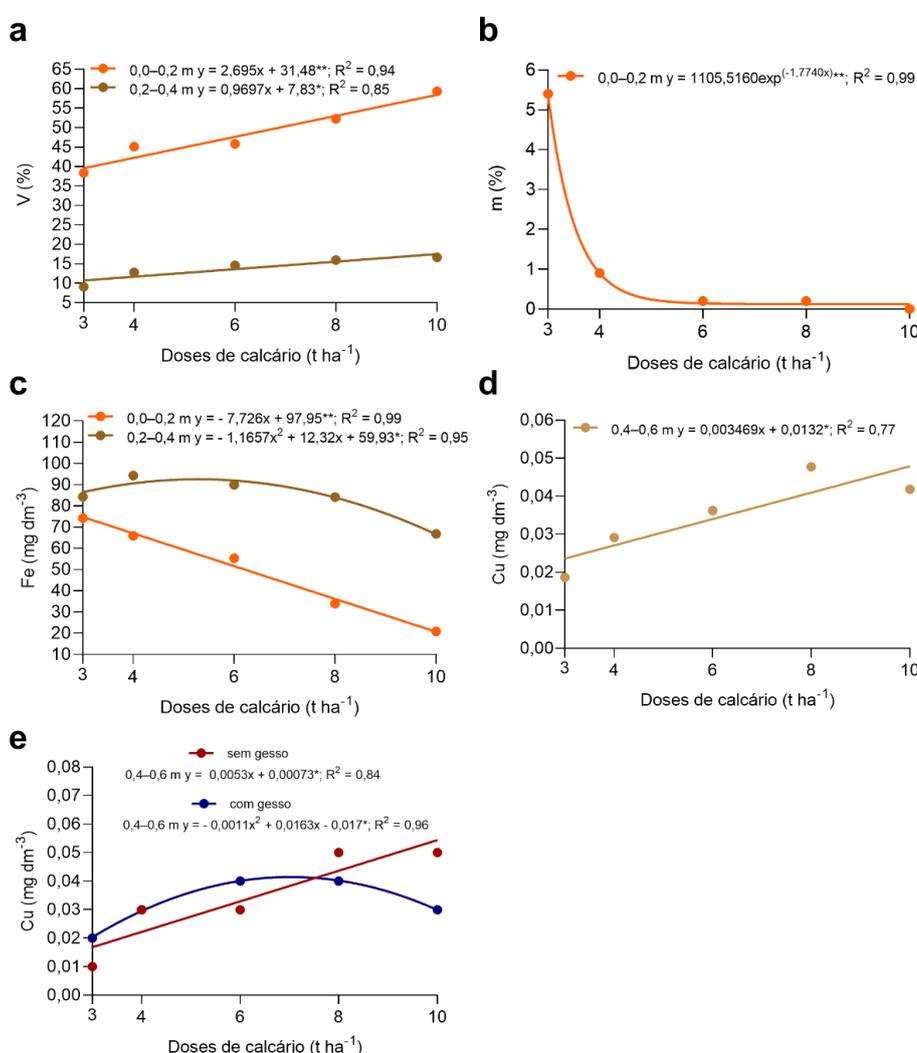
Na profundidade de 0,0–0,2 m, a dose de 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário promoveu maior valor de pH (6,28 em CaCl<sub>2</sub>) (Figura 4a), concentração de P (32 mg dm<sup>-3</sup>) (Figura 4b), K (54 mg dm<sup>-3</sup>) (Figura 4c), Ca<sup>2+</sup> (2,73 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) (Figura 4d), Mg<sup>2+</sup> (1,29 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) (Figura 4e) e valor de SB (4,11 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) (Figura 4h). O Al<sup>3+</sup> ajustou-se ao modelo exponencial decrescente, com menores valores com doses elevadas de calcário (Figura 4f). O H+Al atingiu menor valor (2,85 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) com a máxima dose de calcário (Figura 4g). Na profundidade de 0,2–0,4 m, o Ca<sup>2+</sup> apresentaram maior concentração após a dose de 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário.



**Figura 4** Valor de pH em CaCl<sub>2</sub> (a), concentração de P (b), K (c) Ca<sup>2+</sup> (d), Mg<sup>2+</sup> (e), Al<sup>3+</sup> (f) H+Al (g) e SB Cu (g) do solo em resposta a doses elevadas de calcário na safra agrícola 2021/2022.

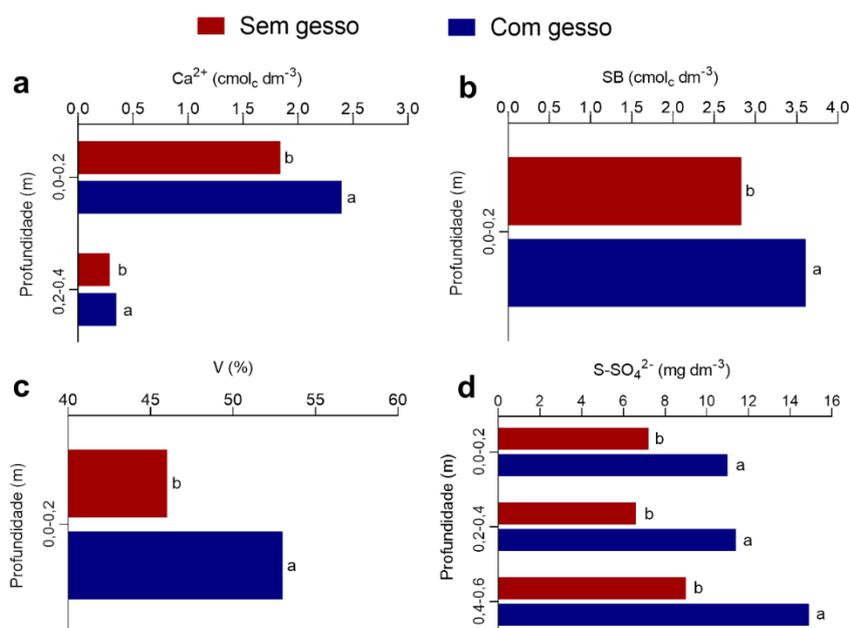
Na profundidade de 0,0–0,2 e 0,2–0,4 m, o valor de V (Figura 5a) ajustou-se ao modelo linear crescente, atingindo 59 e 17%, respectivamente, com a dose de 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário. Os dados de m se ajustaram ao modelo exponencial, atingindo menores valores com doses elevadas de calcário na profundidade de 0,0–0,2 m (Figura 5b). Foram observadas maiores concentrações de Fe (Figura

5c) com as doses de 3 e 5,3 t ha<sup>-1</sup> de calcário na profundidade de 0,0–0,2 e 0,2–0,4 m, respectivamente. Na profundidade de 0,4–0,6 m, o aumento das doses de calcário favoreceu o acréscimo de Cu (Figura 5d), mas quando combinado com o gesso houve decréscimo a partir de 7,4 t ha<sup>-1</sup> de calcário (Figura 5e).



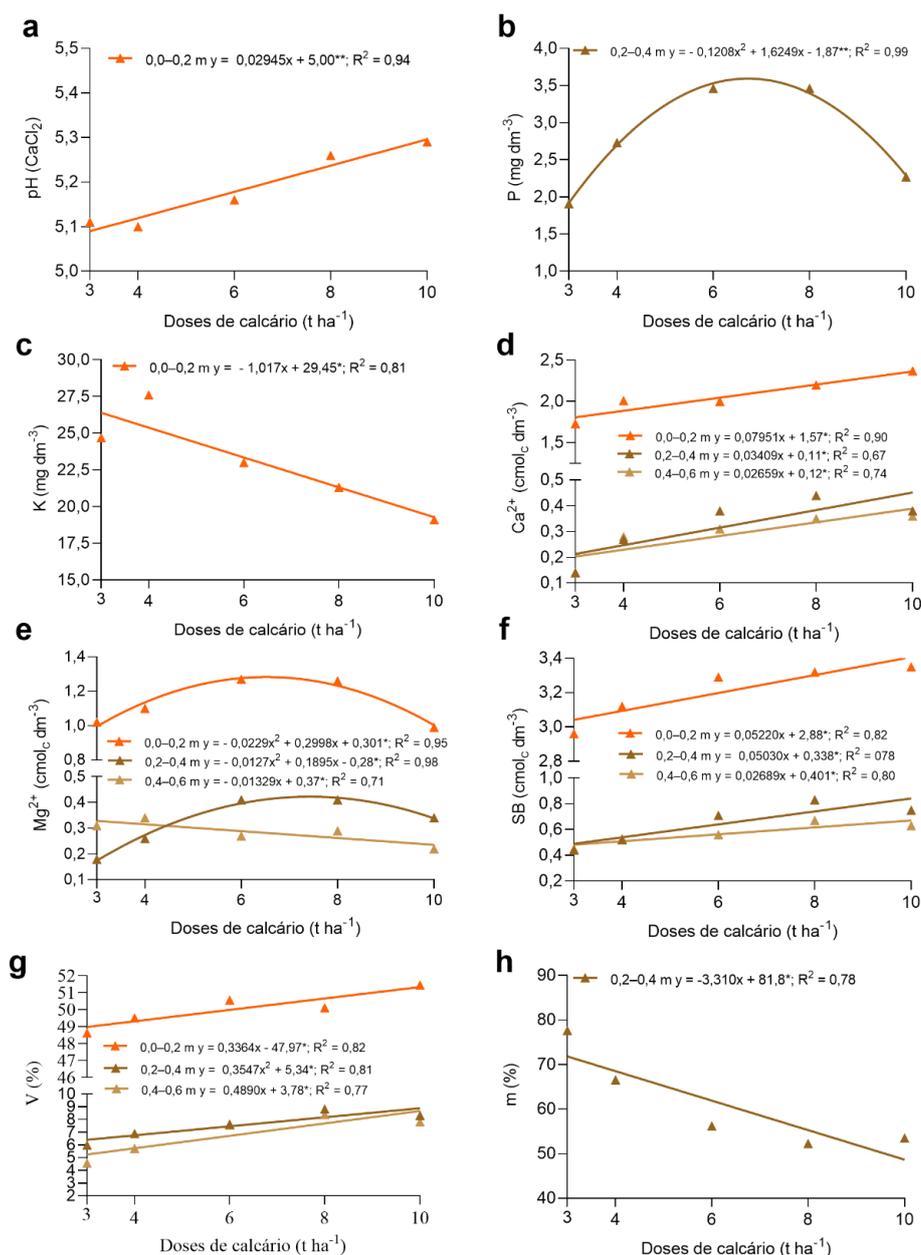
**Figura 5** V (a), m (b), Fe (c) e Cu (d) solo em resposta a doses elevadas de calcário na safra agrícola 2021/2022. Concentração de Cu (e) do solo em resposta a doses elevadas de calcário e sem ou com gesso na safra agrícola 2021/2022.

Na safra agrícola 2022/2023, o gesso contribuiu com o aumento 28 e 23% de Ca<sup>2+</sup> na profundidade de 0,0–0,2 e 0,2–0,4 m, respectivamente (Figura 6a). O aumento da concentração de Ca<sup>2+</sup> resultou em aumento da SB (Figura 6b) e V (Figura 6c), atingindo 3,61 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e 53%, respectivamente, na profundidade de 0,0–0,2 m. Além disso, também houve aumento de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> em 35, 42 e 40% na profundidade de 0,0–0,2, 0,2–0,4 e 0,4–0,6 m, respectivamente (Figura 6d).



**Figura 6** Concentração de Ca<sup>2+</sup> (b), valor de SB (c), V (d) e S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> do solo em resposta ao gesso agrícola na safra agrícola 2022/2023.

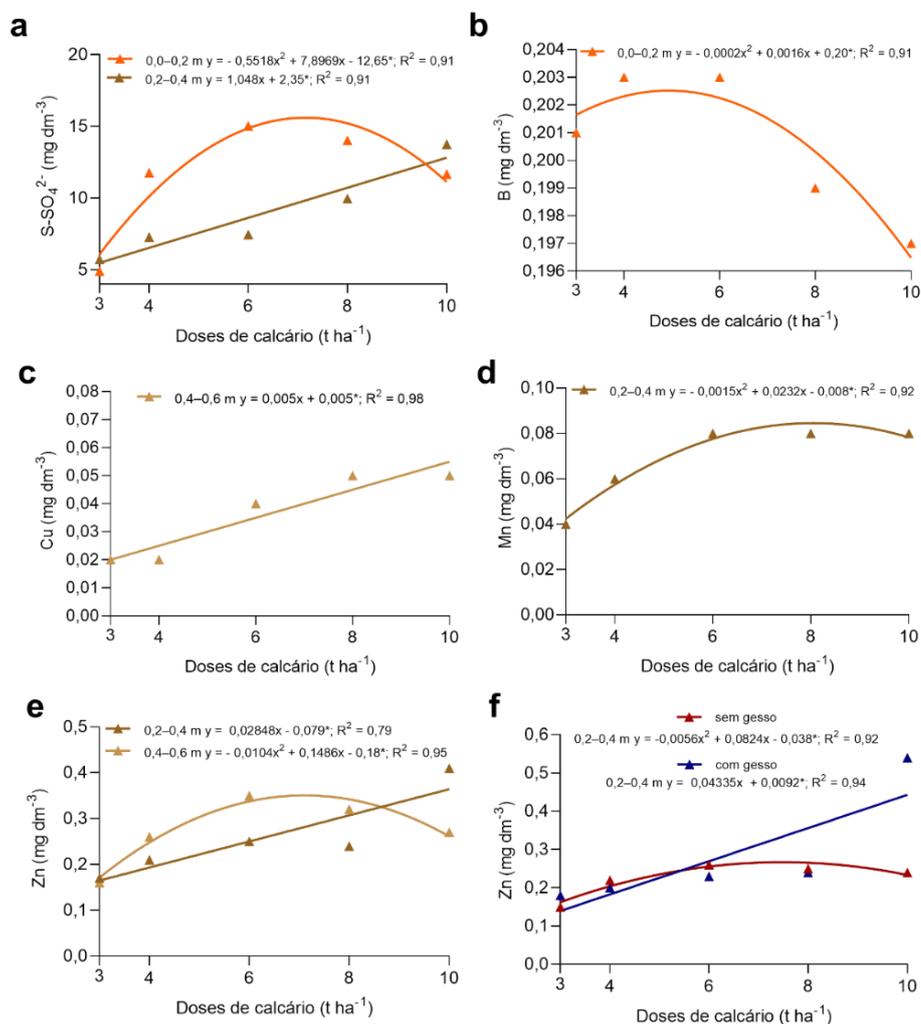
Houve aumento do valor de pH com o aporte de calcário no solo, atingindo 5,29 com 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário na profundidade de 0,0–0,2 m (Figura 7a). Na profundidade de 0,2–0,4 m, foi observada concentração máxima (3,59 mg dm<sup>-3</sup>) de P com a dose de 6,7 t ha<sup>-1</sup> de calcário (Figura 7b). O aumento das doses de calcário ocasionou decréscimo de 23% na disponibilidade de K na profundidade de 0,0–0,2 m (Figura 7c). A concentração de Ca<sup>2+</sup> se ajustou ao modelo linear crescente, cuja dose de 10 t ha<sup>-1</sup> proporcionou as maiores concentrações, sendo estas 2,37, 0,38 e 0,36 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> nas profundidades de 0,0–0,2, 0,2–0,4 e 0,4–0,6 m, respectivamente (Figura 7d). Concentrações maiores de Mg<sup>2+</sup> no solo foram obtidas nas doses de 6,5 (1,28 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), 7,5 (0,99 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e 3,0 t ha<sup>-1</sup> (0,31 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) de calcário nas profundidades de 0,0–0,2, 0,2–0,4 e 0,4–0,6 m, respectivamente (Figura 7e). A dose de 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário promoveu maiores valores de SB (Figura 7f) e V (Figura 7g) nas profundidades estudadas. Na profundidade de 0,2–0,4 m, a dose 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário causou decréscimo de 54% do valor de m (Figura 7h).



**Figura 7** Valor de pH em CaCl<sub>2</sub> (a), concentração de P (b), K (c) Ca<sup>2+</sup> (d), Mg<sup>2+</sup> (e), valor de SB (f), V (g) e concentração de Al<sup>3+</sup> (h) do solo em resposta a doses elevadas de calcário na safra agrícola 2022/2023.

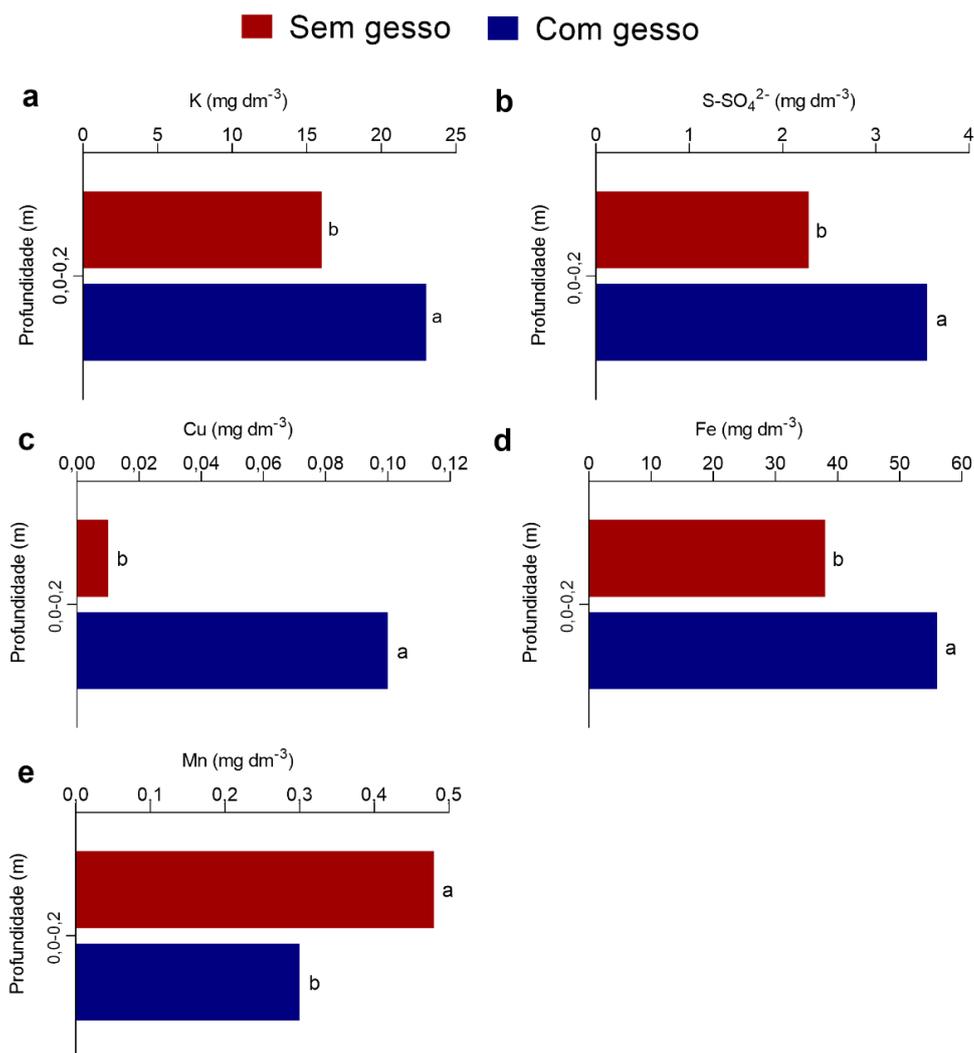
Na profundidade de 0,0–0,2 (Figura 8a) e 0,2–0,4 m, o S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> apresentou maior concentração na dose de 7,2 e 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário, respectivamente, com 15,6 e 13,8 mg dm<sup>-3</sup> (Figura 8a). Houve acréscimo de B até a dose de 4,0 t ha<sup>-1</sup> de calcário (Figura 8b). Na profundidade de 0,4–0,6 m, o Cu apresentou ajuste linear crescente, atingindo 0,05 mg dm<sup>-3</sup> (Figura 8c). A dose de 7,7 t ha<sup>-1</sup> de calcário promoveu maior concentração de Mn (0,08 mg dm<sup>-3</sup>) na profundidade de 0,2–0,4 m (Figura 8d). A dose de 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário (0,41 mg dm<sup>-3</sup>)

proporcionou maior concentração de Zn na profundidade de 0,2–0,4 m (Figura 8e). Na profundidade de 0,4–0,6 m, a associação do gesso com 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário proporcionou maior concentração de Zn (0,54 mg dm<sup>-3</sup>) (Figura 8f).



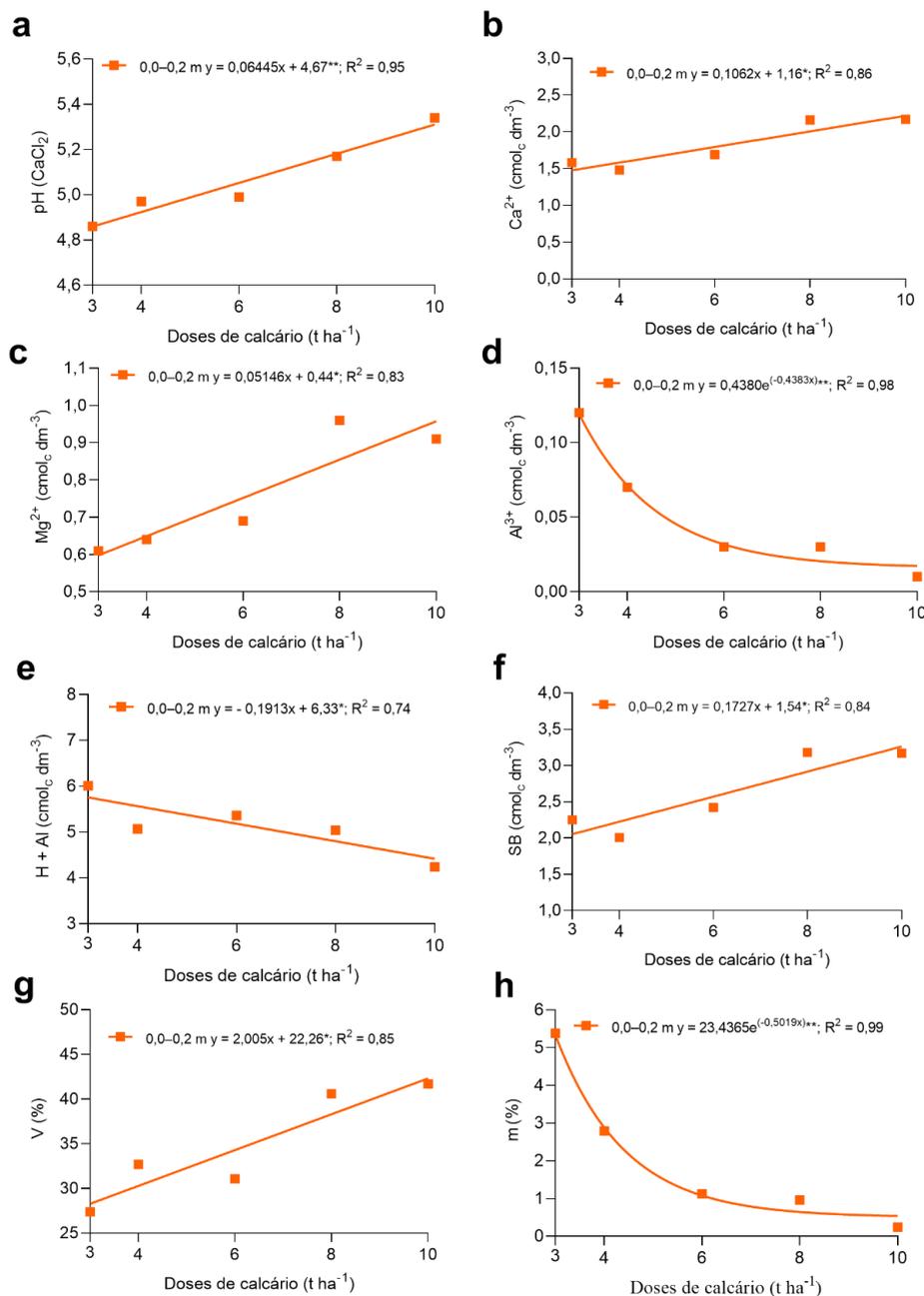
**Figura 8** Concentração de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (a), B (b), Cu (c) Mn (d) e Zn (e) do solo em resposta a doses elevadas de calcário na safra agrícola 2022/2023. Concentração de Zn (f) do solo em resposta a doses elevadas de calcário e sem ou com gesso na safra agrícola 2021/2022.

Na safra 2023/2024, o gesso aumentou a disponibilidade de K (Figura 9a), S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Figura 9b), Cu (Figura 9c) e Fe (Figura 9d) em 30, 37, 90 e 32%, respectivamente, na profundidade de 0,0-0,2 m. Para a mesma profundidade, no entanto, o uso do gesso também ocasionou a diminuição da concentração de Mn no solo em 38% (Figura 9e).



**Figura 9** Concentração de K (a), S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (b), Cu (c), Fe (d) e Mn (e) do solo em resposta ao gesso agrícola na safra agrícola 2023/2024.

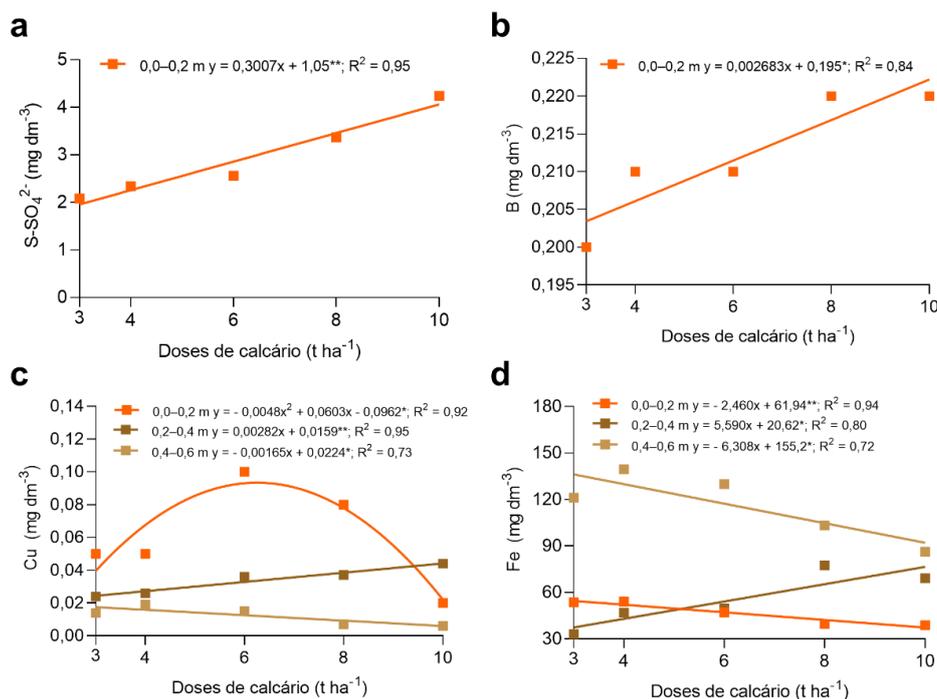
Na profundidade de 0,0–0,2 m, os maiores valores de pH (5,34 em CaCl<sub>2</sub>), Ca<sup>2+</sup> (2,17 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Mg<sup>2+</sup> (0,91 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), SB (3,17 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e V (42%) foram alcançados com a aplicação de 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário (Figura 10). A dose de 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário permitiu diminuir Al<sup>3+</sup>, H+Al e m em 92, 29 e 96%, respectivamente, na profundidade de 0,0–0,2 m.



**Figura 10** pH em CaCl<sub>2</sub> (a), Ca<sup>2+</sup> (b), Mg<sup>2+</sup> (c), Al<sup>3+</sup> (d), H+Al (e), SB (f), V (g) e m (h) do solo em resposta a doses elevadas de calcário na safra agrícola 2023/2024.

Na profundidade de 0,0–0,2 m do solo, maiores concentrações de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (4,2 mg dm<sup>-3</sup>), B (0,22 mg dm<sup>-3</sup>), Cu (0,09 mg dm<sup>-3</sup>) e Fe (54 mg dm<sup>-3</sup>) foram observadas com a dose de 10, 10, 6,3 e 3 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 11). Na profundidade de 0,2–0,4 m, as concentrações de Cu e Fe atingiram 0,04 e 69 mg dm<sup>-3</sup> com a dose de 10 t ha<sup>-1</sup>. Contudo, na profundidade de 0,4–0,6 m foi

observado que as concentrações de Cu e Fe decresceram em 57 e 29% com o aumento das doses de calcário no solo, respectivamente.

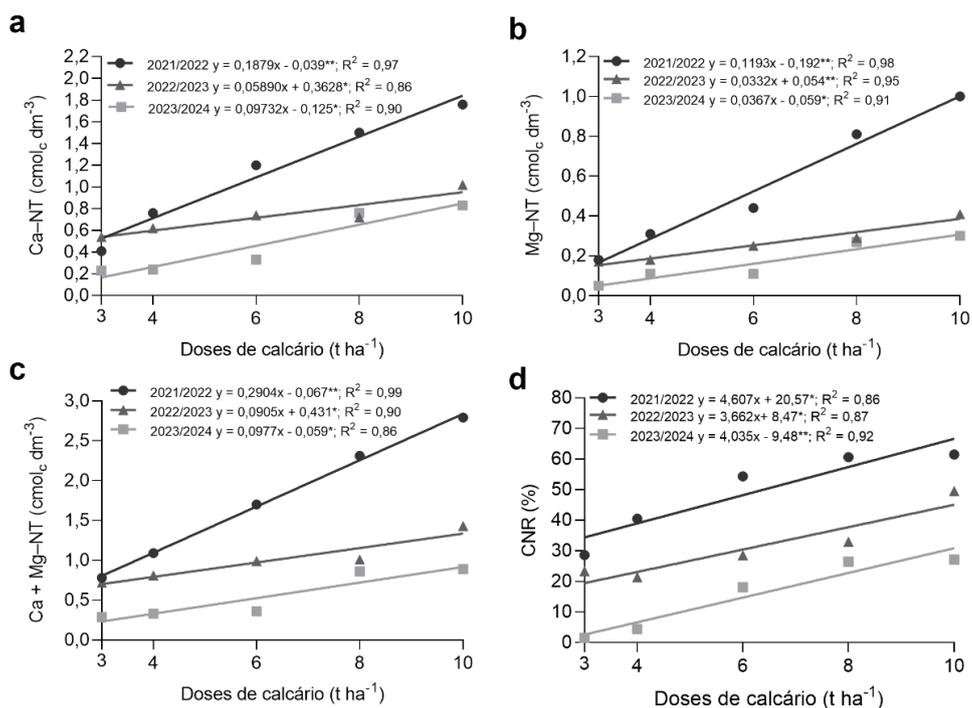


**Figura 11** S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (a), B (b), Cu (c) e Fe (d) do solo em resposta a doses elevadas de calcário na safra agrícola 2023/2024.

### 3.2 Concentração de Ca e Mg não trocáveis do solo

O calcário alterou significativamente ( $p < 0,05$ ) a concentração de Ca-NT, Mg-NT, Ca+Mg-NT e o valor de CNR (Apêndice 4), sendo estes ajustados ao modelo linear crescente (Figura 12). A dose de 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário proporcionou 1,76, 1,02 e 0,83 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Ca-NT nas 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024, respectivamente. A dose de 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário proporcionou 1,00, 0,41 e 0,30 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de Mg-NT nas 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024, respectivamente. Nas safras 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024, foi confirmado que 29, 24 e 2% do calcário não reagiu no solo com a dose de 3 t ha<sup>-1</sup> de calcário, respectivamente. Mas com a dose de 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário, os valores do CNR foram ainda maiores, sendo estes, 62, 50 e 27% nas safras 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024, respectivamente. Desta forma, no primeiro ano de cultivo agrícola, houve reação de 71, 60, 45, 39 e 38% do calcário nas doses de 3, 4, 6, 8 e 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário, respectivamente (Apêndice 5). Ao final do terceiro ano de cultivo agrícola, os dados indicam ainda que, aproximadamente, 98, 96,

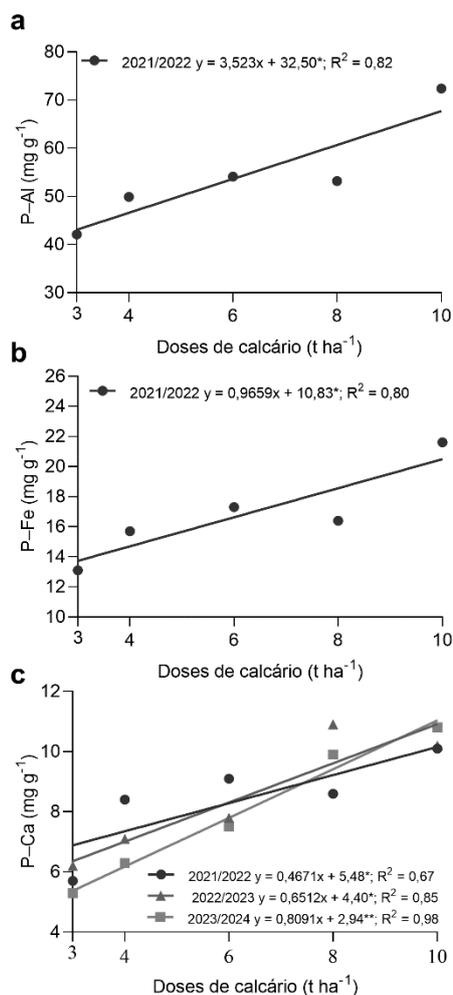
82, 74 e 73 % do calcário reagiu no solo após a aplicação das doses de 3, 4, 6, 8 e 10 t há<sup>-1</sup> de calcário, respectivamente.



**Figura 12** Concentração de Ca-NT (a), Mg-NT (b), Ca + Mg-NT (c) e valor de CNR (d) do solo em resposta a doses elevadas de calcário nas safras agrícolas 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024.

### 3.3 Fracionamento inorgânico do P no solo

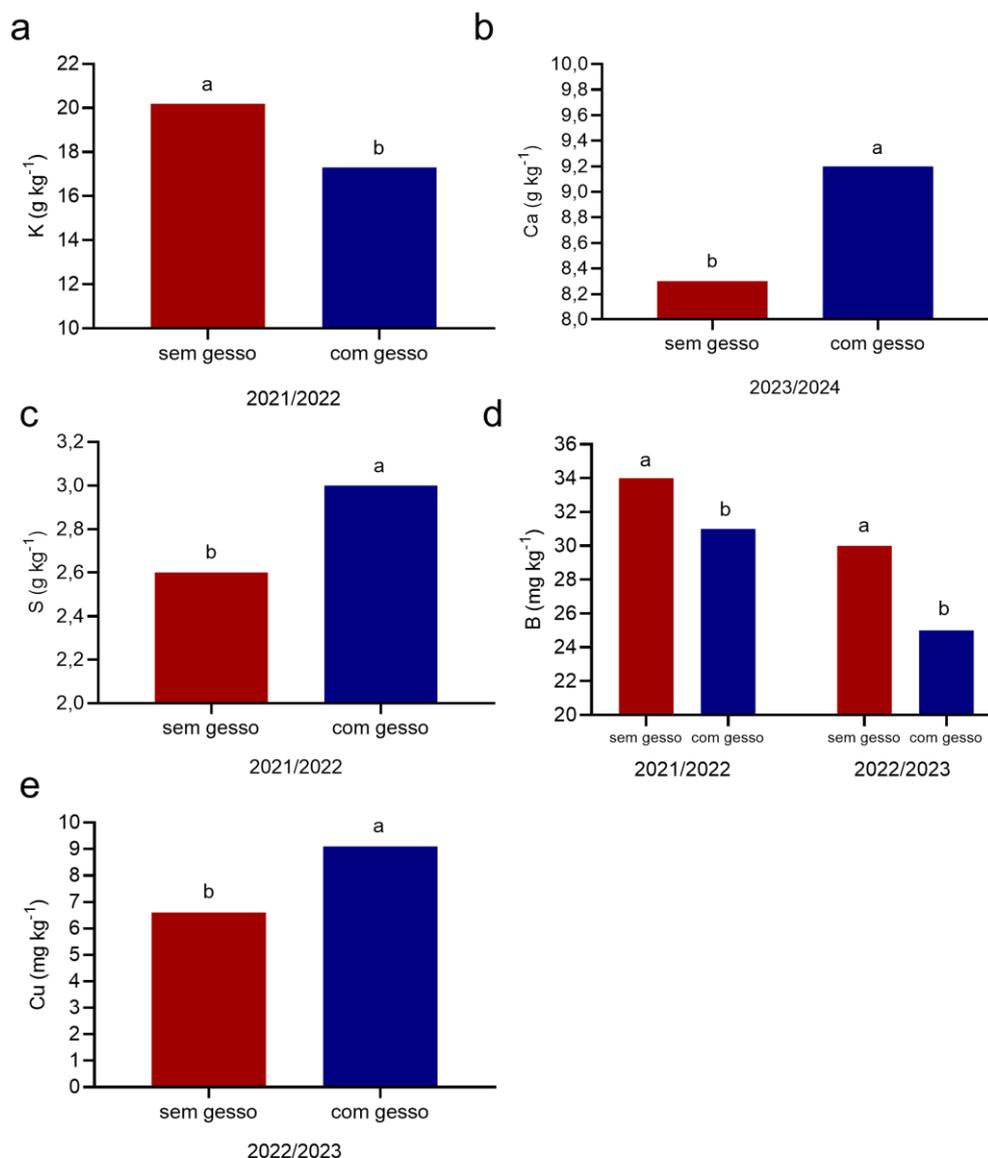
O aporte de calcário em área recém convertida para o cultivo da soja alterou significativamente ( $p < 0,05$ ) a dinâmica da fração inorgânica do P no solo (Apêndice 6). Na safra 2021/2022, o aumento da dose de calcário promoveu resposta linear crescente nas frações P-Al (Figura 13<sup>a</sup>) e P-Fe (Figura 13<sup>b</sup>), sendo que a dose de 10 t há<sup>-1</sup> de calcário proporcionou 72 e 22 mg g<sup>-1</sup> de P-Al e P-Fe, respectivamente. O aumento das doses de calcário também promoveu ajuste linear crescente da fração P-Ca (Figura 13<sup>c</sup>), com valor de 10,1, 10,2 e 10,8 mg g<sup>-1</sup> nas safras 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024, respectivamente.



**Figura 13** Fração inorgânica de P-Al (a), P-Fe (b) e P-Ca (c) do solo em resposta a doses elevadas de calcário nas safras agrícola 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024.

### 3.4 Estado nutricional da soja

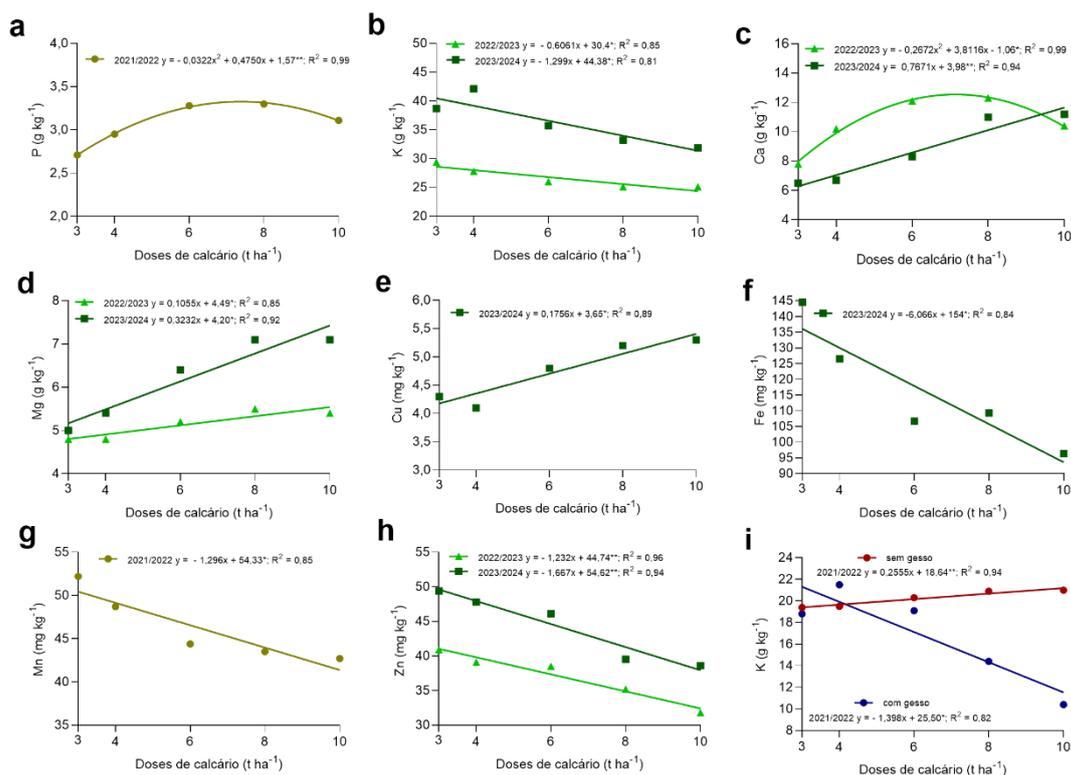
O efeito do calcário e gesso no solo provocou alterações significativas ( $p < 0,05$ ) no estado nutricional da soja (Apêndice 7). Na safra 2021/2022, o gesso aumentou em 13% o teor foliar de S, mas reduziu em 14 e 9% o teor foliar de K e B na soja, respectivamente. Na safra 2022/2023 também foi observado redução do teor do B em 17% com a presença do gesso, contudo, acompanhado do aumento de 27% do teor de Cu. Com o uso do gesso, houve ainda, acréscimo de 10% do teor de Ca foliar na soja na safra 2023/2024.



**Figura 14** Teor foliar de K (a), Ca (b), S (c) B (d) e Cu (e) da soja em resposta ao gesso agrícola nas safras agrícolas 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024.

A dose de 7,4 t há<sup>-1</sup> de calcário proporcionou maior teor foliar de P (3,32 g kg<sup>-1</sup>) na safra 2021/2022 (Figura 15<sup>a</sup>). Na mesma safra, houve aumento linear do teor de K com o aumento das doses de calcário, alcançando 21 g kg<sup>-1</sup>. No entanto, a interação do calcário com o gesso promoveu diminuição de 45% do teor de K (Figura 15i). Nas safras seguintes, foi constatado redução de 17% do teor foliar de K com o aumento das doses de calcário (Figura 15b). O calcário aumentou o teor foliar de Ca na soja, sendo que neste caso, maiores teores foram alcançados com 7,1 e 10 t há<sup>-1</sup> nas safras 2022/2023 (12,5 g kg<sup>-1</sup>) e 2023/2024 (11,2 g kg<sup>-1</sup>), respectivamente (Figura 15c). A dose de 10 t há<sup>-1</sup>

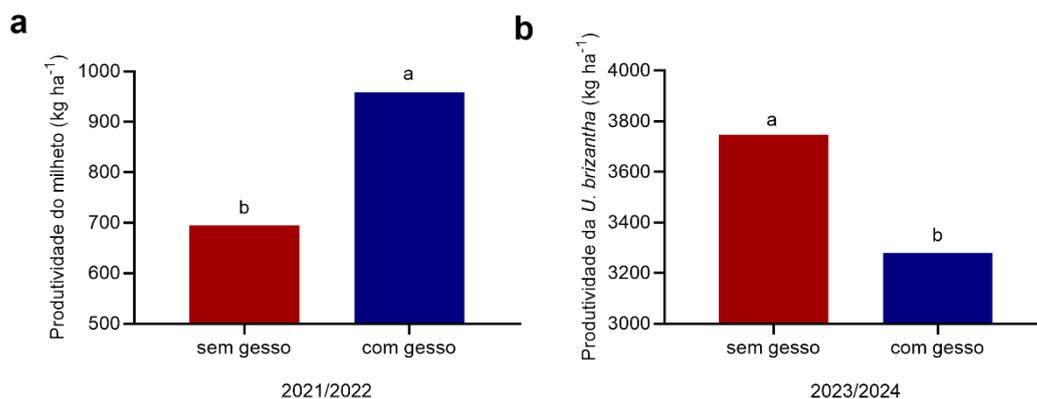
proporcionou maior teor foliar de Mg nas safras 2022/2023 (5,4 g kg<sup>-1</sup>) e 2023/2024 (7,1 g kg<sup>-1</sup>) (Figura 15d). O maior teor foliar de Cu na safra 2023/2024 foi encontrado com a aplicação de 10 t há<sup>-1</sup> de calcário (5,3 mg kg<sup>-1</sup>) (Figura 15e). Os micronutrientes Fe (Figura 15f) Mn (Figura 15g) e Zn (Figura 15h) apresentaram resposta linear decrescente, sendo observada redução de 33% do teor de Fe na safra 2023/2024 e 18% do teor de Mn na safra 2021/2022. No caso do Zn, houve redução de 22% na 2022/2023 e 2023/2024.



**Figura 15.** Teor foliar de P (a), K (b), Ca (c), Mg (d), Cu (e), Fe (f), Mn (g) e Zn (h) na soja em resposta a doses elevadas de calcário no solo nas safras agrícolas 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024. Teor foliar de K (i) na soja em resposta a doses elevadas de calcário e sem ou com gesso no solo na safra agrícola 2021/2022.

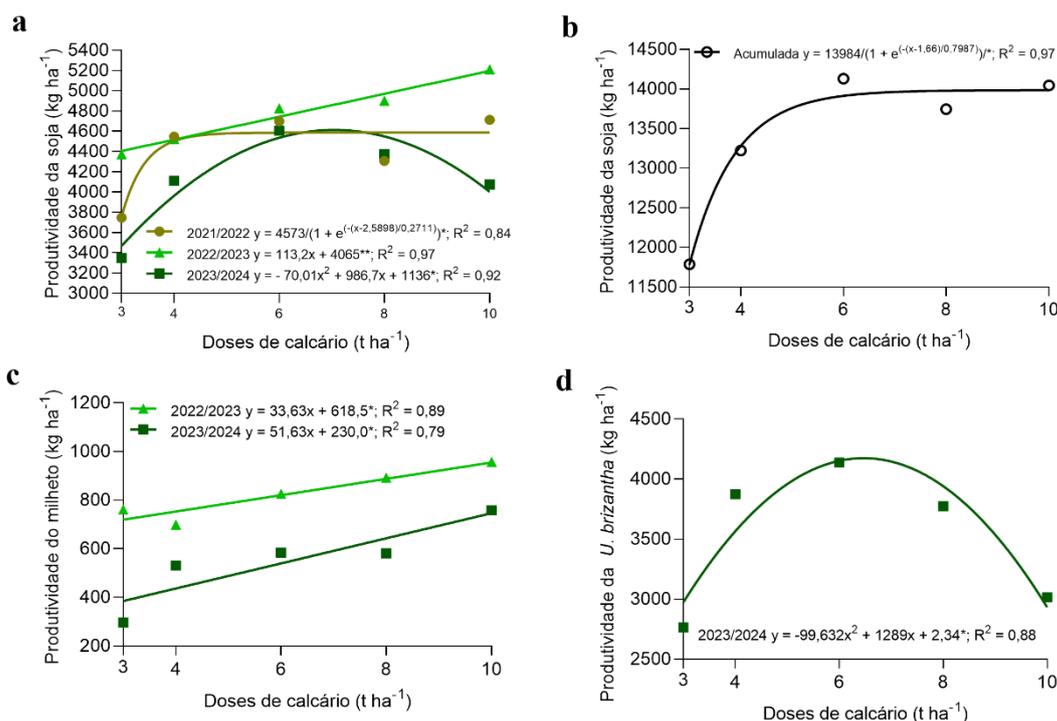
#### 4.5 Produtividade das culturas

A produtividade de grãos de soja e das culturas agrícolas em rotação com a soja apresentou resposta significativa ( $p < 0,05$ ) quanto a aplicação do calcário e gesso (Apêndice 8). O aporte de gesso aumentou em 28% a produtividade de grãos do milho na safra agrícola 2022/2023 (Figura 16<sup>a</sup>), mas diminuiu a produção de biomassa da *U. brizantha* em 12% safra 2023/2024 (Figura 16b).



**Figura 16** Produtividade de grãos do milho (a) e biomassa da *U. brizantha* (b) em resposta ao gesso agrícola.

Na safra agrícola 2021/2022, a dose de 3 t há<sup>-1</sup> de calcário proporcionou menor produtividade de grãos da soja (3747,5 kg há<sup>-1</sup>), mas com o aumento das doses de calcário, foi possível atingir a produtividade máxima correspondente a 4573 kg há<sup>-1</sup>, com estabilização próxima à dose de 4 t há<sup>-1</sup> de calcário (Figura 17<sup>a</sup>). Na safra 2022/2023, a produtividade da soja aumentou linearmente em resposta ao aumento das doses de calcário, alcançando 5210,9 kg há<sup>-1</sup> com a dose de 10 t há<sup>-1</sup>. Na safra 2023/2024, com a dose de 3 t há<sup>-1</sup> de calcário, foi obtida uma produtividade de 3348,1 kg há<sup>-1</sup> de grãos de soja, ou seja, 27% inferior à máxima produtividade (4612,6 kg há<sup>-1</sup>) obtida com a dose de 7,0 t há<sup>-1</sup> de calcário. A produtividade acumulada dos grãos da soja indicou tendência de estabilização da produtividade máxima (13984 kg há<sup>-1</sup>) a partir da dose de 6 t há<sup>-1</sup> de calcário. (Figura 17b). A dose de 10 t há<sup>-1</sup> de calcário proporcionou maior incremento em produtividade de grãos do milho, com 957,0 e 758,0 kg há<sup>-1</sup> nas safras 2022/2023 e 2023/2024, respectivamente (Figura 17c). A máxima produtividade de biomassa da *U. brizantha* (4171,4 kg há<sup>-1</sup>) foi obtida com a dose de 6,5 t há<sup>-1</sup> de calcário (Figura 17d).



**Figura 17** Produtividade de grãos da soja (a, b), grãos do milho (b) e biomassa da *U. brizantha* (c) em resposta a doses elevadas de calcário.

#### 4 Discussão

O período entre a aplicação do calcário e o final do primeiro ano agrícola (colheita da soja) compreendeu 154 dias, com precipitação acumulada de 1581 mm. Como o período de aplicação do calcário coincide com o início do período chuvoso e a semeadura da soja, isto possibilitou que a reação ocorresse em concomitância com o desenvolvimento da soja. Na primeira safra agrícola (2021/2022), a dose convencional (3 t há<sup>-1</sup>) do calcário não reduziu efetivamente os três principais componentes da acidez do solo (acidez ativa (pH), potencial (H + Al) e trocável (Al<sup>3+</sup>)), enquanto que menores valores dos componentes da acidez foram somente alcançados com doses mais elevadas de calcário e, que por isto, proporcionaram melhorias da qualidade química do solo (SB, V). Durante a dissolução do calcário, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup> e íons neutralizantes (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>) são liberados (Besen *et al.*, 2021). O Ca<sup>+2</sup> e Mg<sup>+2</sup> deslocam o Al<sup>3+</sup> do complexo de troca do solo (Rheinheimer *et al.*, 2018), enquanto os íons neutralizantes reagem com os cátions da reação ácida (H<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>) e efetuam

elevação no pH e neutralização do  $\text{Al}^{3+}$  (Vargas *et al.*, 2019; Deus *et al.*, 2020). Por isto, tal reação é ainda mais expressiva após o aporte de maiores doses de calcário, pois doses elevadas liberam maiores quantidades de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em um curto período de tempo (Auler *et al.*, 2019).

Na segunda safra (2022/2023), os efeitos do calcário não foram limitados somente na profundidade superficial (0,0–0,2 m). Como consequência do alívio da acidez na profundidade onde o calcário foi incorporado, a frente de alcalinização avançou verticalmente no perfil do solo (Rheinheimer *et al.*, 2018). Na zona de dissolução do calcário, os produtos ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  ou  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ) se tornam livres em solução, migrando para camadas mais profundas do solo por meio da percolação de água. Quando estes produtos atingem camadas do solo com pH menor que 6,35 em  $\text{H}_2\text{O}$ , há a dissociação, liberando o cátion acompanhante ( $\text{Ca}^{2+}$  e/ou  $\text{Mg}^{2+}$ ) e  $\text{HCO}_3^-$  (Minato *et al.*, 2023). Por isso, doses elevadas de calcário aliviam a acidez do solo na zona onde o calcário foi incorporado mais rapidamente na segunda safra, influenciando o movimento descendente do íon  $\text{HCO}_3^-$  que neutraliza o  $\text{Al}^{3+}$ , enquanto há aumento da concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  nas camadas adjacentes (Silva *et al.*, 2015; Tiritan *et al.*, 2016; Vargas *et al.*, 2019). Desta forma, a dose convencionalmente empregada não é suficiente para neutralizar o  $\text{Al}^{3+}$  em camadas mais profundas (Calegari *et al.*, 2013).

Na terceira safra (2023/2024) é possível constatar os efeitos da acidificação do solo, principalmente após a dose convencional de calcário. Na safra 2021/2022, o valor de V atingiu 38 e 59% com as doses de 3 e 10  $\text{t ha}^{-1}$  de calcário, respectivamente, mas na terceira safra, os valores de V foram inferiores, atingindo 28 e 42%, respectivamente, com as doses de 3 e 10  $\text{t ha}^{-1}$  de calcário. A acidificação é um processo atribuído a vários fatores aos quais o agroecossistema está submetido, como a lixiviação de bases, absorção de cátions, exsudação de  $\text{H}^+$  pelas plantas, fertilização nitrogenada (sulfato de amônio) e matéria orgânica em decomposição (Corrêa *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2018a; Bolan *et al.*, 2023). A acidificação do solo ao longo do tempo e o efeito residual do calcário evidenciou ainda mais a importância do uso de doses elevadas de calcário para manter maior quantidade de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  ocupando o complexo de troca do solo e retardando a retomada da acidez.

Apenas a partir da dose de 8 t ha<sup>-1</sup> de calcário foi possível elevar a V acima de 50% na safra 2021/2022. E, embora doses maiores não resultem em aumento da taxa reação do calcário, aumentam a quantidade que reagiu em relação à quantidade de calcário aplicado. Teoricamente, a dose de 3 t ha<sup>-1</sup> de calcário proporcionaria uma V superior a 50%, mas apenas 71% (2,1 t ha<sup>-1</sup>) do calcário aplicado reagiu na safra 2021/2022. No caso da dose de 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário, houve uma taxa de reação menor, de apenas 38% (3,8 t ha<sup>-1</sup>), porém, isto representa uma quantidade efetiva superior de calcário reagido em comparação à dose convencional. Além disso, conforme os dados apresentados, doses menores apresentam maiores taxas de reação e, por isto, menor efeito residual (Tiritan *et al.*, 2016). A dissolução praticamente completa da dose de 3 t ha<sup>-1</sup> de calcário ocorreu após trinta meses, com uma precipitação acumulada de 4963 mm. Isto indica que nessas condições, para manter ou melhorar a qualidade química do solo, é necessário realizar a reaplicação do calcário. Enquanto isto, o aporte de 10 t ha<sup>-1</sup> de calcário ainda proporciona um reservatório de Ca e Mg, ao prolongar o efeito residual, pois a quantidade de calcário não reagido (27%) indica possibilidade do mesmo reagir com o solo ao longo do tempo (Oliveira *et al.*, 2024).

Era esperado que o gesso agrícola neutralizasse o Al<sup>3+</sup> em curto prazo, principalmente em camadas inferiores, devido à alta mobilidade no perfil do solo (Crusciol *et al.*, 2017; Nora *et al.*, 2017b). Os resultados confirmaram que somente com a quantidade aportada do gesso agrícola não foi possível aliviar a acidez trocável do solo. Além disso, é possível que o efeito da neutralização do Al<sup>3+</sup> com doses elevadas de calcário se sobrepôs sobre ao efeito isolado do gesso. Contudo, o gesso agrícola foi uma importante fonte de Ca<sup>2+</sup>, e, sobretudo de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Soratto; Crusciol, 2008), sendo este ânion distribuído ao longo do perfil do solo.

Apesar do acréscimo de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no solo, o gesso provocou efeitos deletérios na disponibilidade da Mg<sup>2+</sup> e K. O S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> pode formar complexos com Mg<sup>2+</sup> e K, como MgSO<sub>4</sub><sup>0</sup> e KSO<sub>4</sub><sup>-</sup>, que aumentam o potencial de lixiviação (Crusciol *et al.*, 2016; Borgmann *et al.*, 2021). Dentre esses cátions, há preferência do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> pelo Mg<sup>2+</sup>, atribuído a maior densidade de carga do Mg<sup>2+</sup>, que resulta em uma ligação iônica mais forte (Besen *et al.*, 2021). No entanto, como o calcário empregado é fonte de Mg e a elevação das doses de calcário

contribuiu com o aumento do  $Mg^{2+}$  no solo (Costa *et al.*, 2023), a combinação do calcário e gesso não afetou o  $Mg^{2+}$ . Além do gesso afetar negativamente a disponibilidade do K, é necessário considerar o efeito competitivo do  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  sobre o K pelos mesmos sítios de adsorção do solo (Vicenzi *et al.*, 2016; Besen *et al.*, 2021), que resultou inclusive, na redução da disponibilidade de K no solo na safra 2022/2023 com o aumento das doses de calcário. No entanto, o gesso aumentou a disponibilidade de K na safra 2023/2024, provavelmente relacionado com a ciclagem do K por *U. brizantha* (Crusciol *et al.*, 2023).

Alguns estudos abordam que o aumento do pH pode reduzir a disponibilidade de micronutrientes catiônicos (Saha *et al.*, 2019; Bossolani *et al.*, 2022). Embora apenas o pH não possa ser exclusivamente usado como indicador (Hartemink; Barrow, 2023), foi observado que o Fe é mais sensível ao aumento do pH do que os outros micronutrientes catiônicos, pois a concentração de Fe diminuiu mais acentuadamente, inclusive em camadas mais profundas, corroborando com Moreira *et al.* (2024). Congruente com o Fe, também foi observada redução da disponibilidade de Mn, tanto com o aumento do calcário como também devido ao aporte do gesso. Além do efeito do pH, há a probabilidade de que o Mn tenha sido deslocado e movido mais profundamente no solo pelo  $Ca^{2+}$ , que apresenta raio semelhante (Gonzalez *et al.*, 2024). Isto difere do B, que apresenta alta mobilidade vertical no perfil do solo devido à predominância da forma  $H_3BO_3^0$  na faixa de pH comumente observada em solos tropicais (Sarkis *et al.*, 2024). Por isso, o aporte do calcário foi importante para diminuir a quantidade de B lixiviado (Sá; Ernani, 2016). Uma outra justificativa é que o B adsorvido ao  $Al(OH)_3$  foi solubilizado com o aumento do pH (Moreira *et al.*, 2017).

A adição de calcário resultou na elevação do P disponível na primeira safra agrícola, devido ao aumento da concentração do íon  $OH^-$ , que promove a precipitação do Fe e  $Al^{3+}$ , solubilizando o P precipitado (Costa; Crusciol, 2016; Besen *et al.*, 2024). No entanto, não foi observado redução das frações P-Fe/Al. A mineralogia da fração argila do solo tropical, como a presença de argilominerais 1:1, óxidos de Fe e Al, explica a predominância da adsorção específica de P, que resulta no aumento das frações P-Fe/Al (Alovisi *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2024). Além disso, a aplicação do fertilizante fosfatado ( $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ ) contribuiu com a saturação dos sítios de adsorção de P (Brignoli *et al.*,

2024). Nas três safras agrícolas, o aumento da fração P–Ca foram consistentes com as doses mais elevadas de calcário. Maiores concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  aumentam a densidade de cargas positivas nas superfícies coloidais, o que resulta em aumento da adsorção de P (Maluf *et al.*, 2018). Apesar disso, o aumento da fração P–Ca associada com doses elevadas de calcário não afetou a disponibilidade de P.

O estado nutricional da soja indicou que além de fornecer e, portanto, aumentar o teor foliar de Ca e Mg, o calcário também melhora a absorção de outros nutrientes (Joris *et al.*, 2016), como P. Somente com doses a partir de  $6 \text{ t ha}^{-1}$  de calcário, o teor de P esteve acima do nível crítico estabelecido para a cultura da soja (Souza *et al.*, 2020). Contudo, o antagonismo entre a absorção de Ca, Mg e K afeta negativamente a absorção de K pela soja (Costa; Crusciol, 2016; Schenfert *et al.*, 2020), embora, não o suficiente para diminuir o teor foliar de K abaixo do nível crítico (Souza *et al.*, 2020). Na primeira safra agrícola, o efeito do gesso no teor foliar de K foi mais pronunciado, pois a dose acima de  $8 \text{ t ha}^{-1}$  de calcário foi crucial para diminuir o teor foliar de K abaixo do nível crítico (Souza *et al.*, 2020). Apesar disso, o gesso foi importante para aumentar o teor foliar de S na soja acima do nível crítico (Souza *et al.*, 2020). Diferente do teor de Cu, o teor de Fe, Mn e Zn foliar diminuíram com o aumento das doses de calcário, atribuído à redução da concentração destes micronutrientes no solo, mas também ao efeito inibitório promovido pelo aumento da absorção de Ca, Mg e K (Moreira *et al.*, 2017). Isto não é configurada uma preocupação, pois a fertilização com micronutrientes é facilitada pela menor demanda das plantas e pode ser mais facilmente corrigida com fertilização foliar (Moreira *et al.*, 2024).

A dose de calcário convencionalmente empregada ( $3 \text{ t ha}^{-1}$ ) mostrou-se ineficiente para alcançar maiores patamares produtivos da soja em área recém convertida para o cultivo agrícola. Contudo, os efeitos em cascata da mitigação da acidez do solo e melhorias na nutrição da soja são responsáveis por modular a produtividade da soja (Bossolani *et al.*, 2021) e por isto, os dados de produtividade acumulada revelaram que é possível aumentar a produtividade da soja aproximadamente até a dose de  $6 \text{ t ha}^{-1}$  de calcário. Porém, a produtividade da soja não respondeu ao aporte de gesso. Alguns estudos abordam resposta da produtividade da soja ao gesso somente quando a toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  está associada às condições de deficiência hídrica (Zandoná *et al.*, 2015; Nora *et al.*,

2017a; Tiecher *et al.*, 2018; Pias *et al.*, 2020; Besen *et al.*, 2024). Imediatamente após a semeadura da soja na safra 2023/2024, foi constatado um breve período de déficit hídrico, com precipitação 59% inferior à média das safras anteriores no mesmo período. Ainda assim, não foi detectada resposta na produtividade da soja relacionada à presença do gesso, provavelmente porque a palhada da *U. brizantha* aliviou os efeitos do déficit hídrico, minimizando a probabilidade de resposta ao gesso.

As melhorias na qualidade química do perfil do solo através do aporte de calcário também propiciaram resposta positiva da produtividade das culturas em rotação com a soja, como o milho e *U. brizantha*. Mas em consonância com a redução da concentração de K no solo após o aporte de gesso, a *U. brizantha* apresentou maior produtividade de biomassa na ausência do gesso. A produtividade do milho, no entanto, apresentou resposta positiva ao aporte de gesso. Como o cultivo do milho ocorre na entressafra, período com baixa disponibilidade de água, há maior propensão de resposta do milho quando comparada com a soja. Um outro fator é que, diferente da soja, gramíneas como o milho são menos eficientes na absorção de  $\text{Ca}^{2+}$  (Tiecher *et al.*, 2018; Borgmann *et al.*, 2021) e na translocação de S (Caires *et al.*, 2011) e, por este motivo, respondem mais favoravelmente ao aporte adicional de  $\text{Ca}^{2+}$  pelo gesso (Fontoura *et al.*, 2019).

## 5 Conclusão

O intervalo de tempo e a precipitação entre a aplicação do calcário e a semeadura da soja são limitantes para a dose convencional corrigir eficientemente a acidez do solo e atingir a saturação por bases almejada em área de fronteira agrícola sob condições tropicais. Portanto, doses elevadas de calcário neutralizam de forma mais eficaz a acidez do solo e promovem melhorias nos atributos de fertilidade do solo, além de constituir uma reserva de calcário, prolongando o efeito residual. O calcário aumenta a solubilidade do P e a fração P-Ca, mas isso não diminui o teor foliar de P na soja. O gesso agrícola demonstrou efeito benéfico somente na produtividade do milho. O calcário aumentou a produtividade do sistema de cultivo soja/plantas de cobertura. Portanto, a dose de  $6 \text{ t ha}^{-1}$  de calcário em área recentemente convertida para o

cultivo agrícola é crucial para aumentar a produtividade da soja, construir a fertilidade do solo e melhorar a nutrição no Cerrado maranhense.

## Referências

- ALOVISI, A. M. T.; CASSOL, C. J.; NASCIMENTO, J. S.; SOARES, N. B.; SILVA JUNIOR, I. R.; SILVA, R. S.; SILVA, J. A. M. Soil factors affecting phosphorus adsorption in soils of the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 22, p. e00298, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00298>.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, 711–728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- APARECIDO, L. E. O.; DUTRA, A. F.; LORENÇONE, P. A.; ALCÂNTARA NETO, F.; LORENÇONE, J. A.; LEITE, M. R. L. Climate change in MATOPIBA region of Brazil: a study on climate extremes in agriculture. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 153, n. 1, p. 87-100, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04509-x>.
- ARAÚJO, M. L. S. D.; RUFINO, I. A. A.; SILVA, F. B.; BRITO, H. C. D.; SANTOS, J. R. N. The Relationship between Climate, Agriculture and Land Cover in Matopiba, Brazil (1985–2020). **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 2670, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16072670>.
- ARAÚJO, M. L. S.; SANO, E. E.; BOLFE, É. L.; SANTOS, J. R. N.; SANTOS, J. S.; SILVA, F. B. Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990–2015). **Land Use Policy**, v. 80, p. 57-67, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.040>.
- AULER, A. C.; CAIRES, E. F.; PIRES, L. F.; GALETTO, S. L.; ROMANIW, J.; CHARNOBAY, A. C. Lime effects in a no-tillage system on Inceptisols in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 16, p. e00206, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00206>.
- BESEN, M. R.; DIAS, G. A. R.; CORDIOLI, V. R.; GOES NETO, A. F.; ZAMPAR, E. J. O.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Short-term effects of lime and phosphogypsum reapplication methods on wheat and maize nutrition. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 17, p. 2583-2596, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1913183>.
- BESEN, M. R.; SANTOS, G. L. A. A. D.; CORDIOLI, V. R.; CONEGLIAN, C. F.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Effects of applying lime and phosphogypsum in soybean and wheat nutrition. **Journal of Plant Nutrition**, v. 47, n. 9, p. 1418-1437, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2308195>.
- BOLAN, N.; SARMAH, A. K.; BORDOLOI, S.; BOLAN, S.; PADHYE, L. P.; ZWIETEN, L. V.; SOORIYAKUMAR, P.; KHAN, B. A.; AHMAD, M.; SALAIMAN, Z. M.; RINKLEBE, J.; WANG, H.; SINGH, B. P.; SIDDIQUE, K. H. M. Soil

acidification and the liming potential of biochar. **Environmental Pollution**, v. 317, p. 120632, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120632>.

BORGMANN, C.; SECCO, D.; MARINS, A. C.; ZANAO JUNIOR, L. A.; BASSEGIO, D.; SOUZA, S. N. M. D.; ZANG, F. N.; SILVA, T. R. B. D. Effect of soil compaction and application of lime and gypsum on soil properties and yield of soybean. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, n. 12, p. 1434-1447, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1885688>.

BOSSOLANI, J. W.; CRUSCIOL, C. A. C.; MORETTI, L. G.; GARCIA, A.; PORTUGAL, J. R.; BERNART, L.; VILELA, R. G.; CAIRES, E. F.; AMADO, T. J. C.; CALONEGO, J. C.; REIS, A. R. Improving soil fertility with lime and phosphogypsum enhances soybean yield and physiological characteristics. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 2, p. 26, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00765-9>.

BOSSOLANI, J. W.; CRUSCIOL, C. A. C.; PORTUGAL, J. R.; MORETTI, L. G.; A, GARCIA, RODRIGUES, V. A.; FONSECA, M. C.; BENART, L.; VILELA, R. G.; MENDONÇA, L. P.; REIS, A. R. Long-term liming improves soil fertility and soybean root growth, reflecting improvements in leaf gas exchange and grain yield. **European Journal of Agronomy**, v. 128, p. 126308, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126308>.

BRIGNOLI, F. M.; GERALDINI, A. P. B.; TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; BATISTA, M. A. Liming and phosphate fertilization influence soil fertility, physical properties, and carbon stock in a subtropical Ferralsol in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 244, p. 106268, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106268>.

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; JORIS, H. A. Use of gypsum for crop grain production under a subtropical no-till cropping system. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 6, p. 1804-1814, 2011. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0192>.

CALEGARI, A.; TIECHER, T.; HARGROVE, W. L.; RALISCH, R.; TESSIER, D.; TOURDONNET, S.; GUIMARÃES, M. F.; SANTOS, D. R. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 32-39, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.05.009>.

CHANG, S.C.; JACKSON, M. L. Soil phosphorus fractions in some representative soils. **Journal of Soil Science**, v. 9, n. 1, p. 109-119, 1958. DOI: [doi:10.1111/j.1365-2389.1958.tb01903.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1958.tb01903.x).

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim da Safra de Grãos**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 23 ago. 2024.

CORRÊA, M. C. D. M.; NATALE, W.; PRADO, R. D. M.; BANZATTO, D. A.; QUEIROZ, R. F.; SILVA, M. A. C. D. Surface application of lime on a guava orchard in production. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. e0170203, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170203>.

- COSTA, C. H. M.; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, v. 74, p. 119-132, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.001>
- COSTA, R. F.; FIRMANO, R. F.; BOSSOLANI, J. W.; ALLEONI, L. R. Soil chemical properties, enzyme activity and soybean and corn yields in a tropical soil under no-till amended with lime and phosphogypsum. **International Journal of Plant Production**, v. 17, n. 2, p. 235-250, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-023-00233-8>.
- CRUSCIOL, C. A. C.; FERREIRA, J. H. S.; MOMESSO, L.; PORTUGAL, J. R.; CAMPOS, M.; VOLF, M. R.; BORGHI, E.; SORATTO, R. P.; CALONEGO, J. C. Lasting effect of *Urochloa brizantha* on a common bean-wheat-maize rotation in a medium-term no-till system. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, p. 940996, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.940996>.
- CRUSCIOL, C. A. C.; ROSSATO, O. B.; FOLTRAN, R.; MARTELLO, J. M.; NASCIMENTO, C. A. C. D. Soil fertility, sugarcane yield affected by limestone, silicate, and gypsum application. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 48, n. 19, p. 2314-2323, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1411507>.
- CRUSCIOL, C. A.; ARTIGIANI, A. C.; ARF, O.; CARMEIS FILHO, A. C.; SORATTO, R. P.; NASCENTE, A. S.; ALVAREZ, R. C. Surface application of lime–silicate–phosphogypsum mixtures for improving tropical soil properties and irrigated common bean yield. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 4, p. 930-942, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0348>.
- DEUS, A. C. F.; BÜLL, L. T.; GUPPY, C. N.; SANTOS, S. D. M. C.; MOREIRA, L. L. Q. Effects of lime and steel slag application on soil fertility and soybean yield under a no till-system. **Soil and Tillage Research**, v. 196, p. 104422, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104422>.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: A Computer Analysis System To Fixed Effects Split Plot Type Designs: Sisvar. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 37, p. 529–535, 2019. DOI: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.
- FERREIRA, M. E.; FERREIRA JÚNIOR, L. G.; MIZIARA, F.; SOARES-FILHO, B. S. Modeling landscape dynamics in the central Brazilian savanna biome: future scenarios and perspectives for conservation. **Journal of Land Use Science**, v. 8, n. 4, p. 403-421, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1080/1747423X.2012.675363>.
- FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 62-68, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.017>.
- FIRMANO, R. F.; COLZATO, M.; ALLEONI, L. R. Phosphorus speciation and distribution in a variable-charge Oxisol under no-till amended with lime and/or phosphogypsum for 18 years. **European Journal of Soil Science**, v. 73, n. 1, p. e13198, 2022. <https://doi.org/10.1111/ejss.13198>.

FONTOURA, S. M. V.; PIAS, O. H. C.; TIECHER, T.; CHERUBIN, M. R.; MORAES, R. P.; BAYER, C. Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 193, p. 27-41, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.005>.

GONZALEZ, J. M.; DICK, W. A.; ISLAM, K. R.; WATTS, D. B.; FAUSEY, N. R.; FLANAGAN, D. C.; BATTE, M. T.; VANTOAI, T. T.; REEDER, R. C.; SHEDEKAR, V. S. Cover crops, crop rotation, and gypsum, as conservation practices, impact Mehlich-3 extractable plant nutrients and trace metals. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 12, n. 3, p. 650-662, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.11.001>.

HARTEMINK, A. E.; BARROW, N. J. Soil pH-nutrient relationships: the diagram. **Plant and Soil**, v. 486, n. 1, p. 209-215, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05861-z>.

JORIS, H. A. W.; CAIRES, E. F.; SCHARR, D. A.; BINI, Â. R.; HALISKI, A. Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 162, p. 68-77, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.009>.

MALUF, H. J. G. M.; SILVA, C. A.; CURI, N.; NORTON, L. D.; ROSA, S. D. Adsorption and availability of phosphorus in response to humic acid rates in soils limed with CaCO<sub>3</sub> or MgCO<sub>3</sub>. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, p. 7-20, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-70542018421014518>.

MATELELE, L. A.; ZHANG, N.; ZHANG, X. M.; ANTHONIO, C. K.; ALAM, M. A.; ZHANG, H.; SHUXIANG, Z. Impact of long-term fertilization, straw incorporation and liming on phosphorus fractions, availability and their interactions with soil properties in red soil. **Journal of Soils and Sediments**, p. 1-15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-024-03898-4>.

MINATO, E. A.; BRIGNOLI, F. M.; NETO, M. E.; BESEN, M. R.; CASSIM, B. M. A. R.; LIMA, R. S.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Lime and gypsum application to low-acidity soils: changes in soil chemical properties, residual lime content and crop agronomic performance. **Soil and Tillage Research**, v. 234, p. 105860, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105860>.

MIRANDA, E. E.; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. **Proposta de delimitação territorial do Matopiba**. Nota técnica 1. EMBRAPA. Grupo de Inteligência Territorial Estratégica (GITE), 2014. Disponível em: [https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/gite/publicacoes/NT1\\_DelimitacaoM\\_atopiba.pdf](https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/gite/publicacoes/NT1_DelimitacaoM_atopiba.pdf). Acesso em: 12 jul 2024.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MURAOKA, T.; CARMO, C. A. F. S. do; MELO, W. J. Análise química de tecido vegetal. *In*: SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: [s. n.], 2009. p. 191-234

MOREIRA, S. G.; MORAES, F. A.; PEIXOTO, D. S.; SILVA, J. C. R.; GAUDENCIO, J. R. F.; SILVA, B. M.; SILVA, M.M.; MACEDO, J. R. Deep incorporation of high limestones rates affects the macro and micronutrients

- availability and the accumulated grain yield in three acidic sites in Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 154, p. 127074, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127074>.
- MOREIRA, S. G.; PROCHNOW, L. I.; PAULETTI, V.; SILVA, B. M.; KIEHL, J. D. C.; SILVA, C. G. M. Effect of liming on micronutrient availability to soybean grown in soil under different lengths of time under no tillage. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 39, n. 1, p. 89-97, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i1.30691>.
- MURPHY, J., RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31-36, 1962. DOI: [doi:10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5).
- NORA, D. D.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. D. S.; GRUHN, E. M. Modern high-yielding maize, wheat and soybean cultivars in response to gypsum and lime application on no-till Oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. e0160504, 2017a. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160504>.
- NORA, D. D.; AMADO, T. J. C.; NICOLOSO, R. D. S.; MAZUCO, A. C. B.; PICCIN, M. Mitigation of the gradient of chemical properties in the rooting zone of dystrophic Oxisols by gypsum and lime inputs under a no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. e0150541, 2017b. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150541>.
- OLIVEIRA JÚNIOR, A.; CASTRO, C.; OIVEIRA, F. A.; KLEPKER, D. Fertilidade do solo e estado nutricional da soja. *In*: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JÚNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. C. (Eds.). **Tecnologias de Produção de Soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020, p. 133-184.
- OLIVEIRA, D. B. D.; LACERDA, J. J. D. J.; CAVALCANTE, A. P.; BEZERRA, K. G.; SILVA, A. P. M. D.; MIRANDA, A. C. G.; RAMBO, T. P.; MASCHIO, R.; ANDRADE, H. A. F.; COSTA, P. M.; SOUSA, C. A. F.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. O. L.; SAGRILLO, E.; SOUZA, H. A. D. Lime and Gypsum Rates Effects in New Soybean Areas in the Cerrado of Matopiba, Brazil. **Agriculture**, v. 14, n. 7, p. 1034, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071034>.
- PIAS, O. H. C.; TIECHER, T.; CHERUBIN, M. R.; SILVA, A. G.; BAYER, C. Does gypsum increase crop grain yield on no-tilled acid soils? A meta-analysis. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 2, p. 675-692, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20125>.
- QUAGGIO, J. A.; GALLO, P. B.; MASCARENHAS, H. A. A. Agronomic efficiency of limestones with different acid-neutralizing capacity, under field condition. *In*: **Plant-Soil Interactions at Low pH: Principles and Management**. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1995; p. 491–496.
- RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. IAC Instituto Agrônomo de Campinas: Campinas, Brasil, 2001. 285 p.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, M. V.; CAMARGO, A.; SOARES, E. Perdas de cálcio e magnésio durante cinco anos em ensaio de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 6, p. 33–37, 1982.

REIS, A. R.; LISBOA, L. A. M.; REIS, H. P. G.; BARCELOS, J. P. Q.; SANTOS, E. F.; SANTINI, J. M. K.; MEYER-SAND, B. R. V.; PUTTI, F. F.; GALINDO, F. S.; KANEKO, F. H.; BARBOSA, J. Z.; PAIXÃO, A. P.; FURLANI JUNIOR, E.; FIGUEIREDO, P. A. M.; LAVRES, J. Depicting the physiological and ultrastructural responses of soybean plants to Al stress conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 130, p. 377-390, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.07.028>.

REIS, L.; SILVA, C. M. S.; BEZERRA, B.; MUTTI, P.; SPYRIDES, M. H.; SILVA, P.; MAGALHÃES, T.; FERREIRAS, R.; RODRIGUES, D.; ANDRADE, L. Influence of climate variability on soybean yield in Matopiba, Brazil. **Atmosphere**, v. 11, n. 10, p. 1130, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11101130>.

RHEINHEIMER, D. S.; TIECHER, T.; GONZATTO, R.; ZAFAR, M.; BRUNETTO, G. Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long-term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. **Geoderma**, v. 313, p. 7-16, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.024>.

SÁ, A. A. D.; ERNANI, P. R. Boron leaching decreases with increases on soil pH. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 40, p. e0150008, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150008>.

SAHA, S.; SAHA, B.; SETH, T.; DASGUPTA, S.; RAY, M.; PAL, B.; PATI, S.; MUKHOPADHYAY, S. K.; HAZRA, G. Micronutrients availability in soil–plant system in response to long-term integrated nutrient management under rice–wheat cropping system. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 712-724, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00071-6>.

SANTOS, D. R.; TIECHER, T.; GONZATTO, R.; SANTANNA, M. A.; BRUNETTO, G.; SILVA, L. S. Long-term effect of surface and incorporated liming in the conversion of natural grassland to no-till system for grain production in a highly acidic sandy-loam Ultisol from South Brazilian Campos. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 222-231, 2018a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.014>.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018b. 356 p.

SARKIS, L. F.; RABÊLO, F. H. S.; HIPPLER, F. W. R.; GUELFÍ, D. Soil organic matter influences the agronomic efficiency of boron fertilizers in sandy Oxisol cultivated with soybean. **Scientia Agricola**, v. 81, p. e20230231, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2023-0231>.

SCHENFERT, T. A.; RATKE, R. F.; CASARIN, V.; BARBOSA, J. M.; CHAVES, D. V.; HOLANDA NETO, M. R. D.; ROQUE, C. G.; CARLOS, H. C. V. Lime and gypsum in the implantation no-till system promote the nutrition and yield of

soybean. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 5, p. 641-654, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1701028>.

SILVA, A. A.; LACERDA, J. J. D. J.; ARAÚJO-NETO, R. B.; SAGRILO, E.; LUSTOSA-FILHO, J. F.; ANDRADE, H. A. D.; SOUZA, H. A. Integrated agroforestry system affects the dynamics of inorganic phosphorus fractions in the savanna of Brazilian Northeast. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 104, n. 2, p. 181-190, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjss-2023-0026>.

SILVA, F. C. M. D.; SACHS, L. G.; FONSECA, I. C. B.; TAVARES FILHO, J. Liming in agricultural production models with and without the adoption of crop-livestock integration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1463-1472, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20140730>.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Métodos de determinação de cálcio e magnésio trocáveis e estimativa do calcário residual em um Latossolo submetido à aplicação de calcário e gesso em superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 663–673, 2008.

SOUSA, D. M. G. D.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do Solo e Adubação**. 2. ed. Embrapa Informações Tecnológicas: Brasília, 2004. 416 p.

SOUZA, H. A. D.; VIEIRA, P. F. D. M. J.; ROZANE, D. E.; SAGRILO, E.; LEITE, L. F. C.; FERREIRA, A. C. M. Critical levels and sufficiency ranges for leaf nutrient diagnosis by two methods in soybean grown in the Northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. e0190125, 2020. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20190125>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 574 p.

TIECHER, T.; PIAS, O. H. D. C.; BAYER, C.; MARTINS, A. P.; DENARDIN, L. G. D. O.; ANGHINONI, I. Crop response to gypsum application to subtropical soils under no-till in Brazil: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. e0170025, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20170025>.

TIRITAN, C. S.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A.; CARMEIS FILHO, A. C.; FERNANDES, D. M.; NASCENTE, A. S. Tillage system and lime application in a tropical region: Soil chemical fertility and corn yield in succession to degraded pastures. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 437-447, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.012>.

UMBURANAS, R. C.; SOUZA, M. P.; KOSZALKA, V.; EURICH, K.; LOPES, É. C. P.; CAMILO, E. L.; ÁVILA, F. W.; MÜLLER, M. M. L. Long-term impact of gypsum and nitrogen levels on soil chemical properties and maize forage and grain yield under no-tillage in a subtropical region. **International Journal of Plant Production**, v. 17, n. 1, p. 147-164, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42106-022-00227-y>.

VARGAS, J. P.; SANTOS, D. R.; BASTOS, M. C.; SCHAEFER, G.; PARISI, P. B. Application forms and types of soil acidity corrective: Changes in depth

chemical attributes in long term period experiment. **Soil and Tillage Research**, v. 185, p. 47-60, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.014>.

VICENSI, M.; LOPES, C.; KOSZALKA, V.; UMBURANAS, R. C.; KAWAKAMI, J.; POTT, C. A.; MÜLLER, M. M. L. Gypsum rates and splitting under no-till: Soil fertility, corn performance, accumulated yield and profits. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 2, p. 690-702, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00157-1>.

VICENSI, M.; MÜLLER, M. M. L.; KAWAKAMI, J.; NASCIMENTO, R. D.; MICHALOVICZ, L.; LOPES, C. Do rates and splitting of phosphogypsum applications influence the soil and annual crops in a no-tillage system?. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150155>.

WENG, L.; VEGA, F. A.; VAN RIEMSDIJK, W. H. Competitive and synergistic effects in pH dependent phosphate adsorption in soils: LCD modeling. **Environmental science & technology**, v. 45, n. 19, p. 8420-8428, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/es201844d>.

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; BARRETO, C. F.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 2, p. 128-137, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4530301>.

ZHANG, S.; YANG, X.; HSU, L. C.; LIU, Y. T.; WANG, S. L.; WHITE, J. R.; SHAHEEN, S. M.; CHEN, Q.; RINKLEBE, J. Soil acidification enhances the mobilization of phosphorus under anoxic conditions in an agricultural soil: Investigating the potential for loss of phosphorus to water and the associated environmental risk. **Science of the Total Environment**, v. 793, p. 148531, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148531>.

**APÊNDICE**  
**(Capítulo III)**

**Apêndice 1.** Atributos químicos do solo após a aplicação de doses de calcário e com ou sem gesso na safra agrícola 2021/2022.

	pH	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	CTC	V	m	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	CaCl <sub>2</sub>	mg dm <sup>-3</sup>		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			-----			- % -	----- mg dm <sup>-3</sup> -----						
Profundidade 0,0–0,2 m																	
Gesso (G)	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	**
Calcário (C)	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	**	**	ns	ns	ns	**	ns	ns
G x C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	4,8	26,1	22,4	15,0	23,1	3,2	24,5	14,6	12,9	23,3	30,6	15,0	7,1	0,5	12,9	18,5	7,4
CV <sub>2</sub> (%)	4,6	26,6	29,5	5,9	12,1	2,8	24,4	5,8	8,9	16,2	24,6	17,1	7,0	0,5	25,0	12,4	18,9
Profundidade 0,2–0,4 m																	
Gesso (G)	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	*	ns	*	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
Calcário (C)	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	**	ns	**	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns
G x C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	2,3	8,3	28,0	6,3	18,2	9,6	13,4	9,3	19,6	24,6	19,7	13,9	2,0	2,2	24,2	4,5	5,8
CV <sub>2</sub> (%)	4,6	14,8	18,9	4,9	22,6	27,9	12,5	5,8	12,9	26,5	24,7	10,7	2,5	2,9	24,5	4,1	7,6
Profundidade 0,4–0,6 m																	
Gesso (G)	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
Calcário (C)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns
G x C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	2,4	5,6	23,9	10,2	2,0	16,7	22,4	8,7	12,5	19,5	27,9	14,3	1,08	5,0	18,5	2,5	6,2
CV <sub>2</sub> (%)	3,1	10,1	21,4	7,4	3,5	27,1	22,7	10,5	11,0	17,8	21,8	19,7	2,1	19,5	12,6	1,6	7,1

pH = potencial hidrogeniônico; P = fósforo; K = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; Al<sup>3+</sup> = alumínio; H + Al = acidez potencial; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases; m = saturação por alumínio; S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> = enxofre; B = boro; Cu = cobre; Fe = ferro; Mn = manganês;

Zn = zinco. \* e \*\* = não significativo, significativo a  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$  de probabilidade pelo teste F, respectivamente. CV<sub>1</sub> = coeficiente de variação da parcela; CV<sub>2</sub> = coeficiente de variação da subparcela.

**Apêndice 2.** Atributos químicos do solo após a aplicação de doses de calcário e com ou sem gesso na safra agrícola 2022/2023.

	pH	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	CTC	V	m	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	CaCl <sub>2</sub>	mg dm <sup>-3</sup>		-----	-----	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----	-----	-----	- % -	-----	-----	-----	mg dm <sup>-3</sup>	-----	-----	-----
Profundidade 0,0–0,2 m																	
Gesso (G)	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	**	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
Calcário (C)	*	ns	*	**	*	ns	ns	*	ns	*	ns	**	*	ns	ns	ns	ns
G x C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	2,7	7,1	16,9	17,4	16,5	4,4	10,5	14,3	15,3	8,9	33,8	12,8	0,7	1,9	17,1	10,3	28,7
CV <sub>2</sub> (%)	8,6	13,5	14,4	12,9	16,6	9,9	12,7	23,2	13,8	15,5	89,4	17,7	2,1	2,9	21,4	7,2	21,7
Profundidade 0,2–0,4 m																	
Gesso (G)	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
Calcário (C)	ns	**	ns	**	**	ns	ns	**	ns	**	**	**	ns	ns	ns	*	**
G x C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**
CV <sub>1</sub> (%)	7,2	11,4	20,5	7,4	18,6	5,6	8,3	8,2	20,0	7,9	11,7	11,4	10,8	2,9	7,9	28,4	16,3
CV <sub>2</sub> (%)	4,1	12,9	12,4	11,5	26,6	18,7	9,3	6,1	28,7	25,7	17,9	15,7	11,1	3,5	14,4	29,2	28,0
Profundidade 0,4–0,6 m																	
Gesso (G)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
Calcário (C)	ns	ns	ns	**	**	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	ns	**	ns	**	*
G x C	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	4,5	19,9	18,3	3,2	15,8	18,1	10,5	7,1	9,8	16,2	19,2	21,5	3,7	1,0	29,0	1,2	9,3
CV <sub>2</sub> (%)	3,8	28,9	23,9	3,8	14,5	21,6	13,3	8,8	12,6	19,0	21,8	23,9	3,1	1,6	29,0	1,2	7,9

pH = potencial hidrogeniônico; P = fósforo; K = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; Al<sup>3+</sup> = alumínio; H + Al = acidez potencial; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases; m = saturação por alumínio; S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> = enxofre; B = boro; Cu = cobre; Fe = ferro; Mn = manganês;

Zn = zinco. \* e \*\* = não significativo, significativo a  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$  de probabilidade pelo teste F, respectivamente. CV<sub>1</sub> = coeficiente de variação da parcela; CV<sub>2</sub> = coeficiente de variação da subparcela.

**Apêndice 3.** Atributos químicos do solo após a aplicação de doses de calcário e com ou sem gesso na safra agrícola 2023/2024.

	pH	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	CTC	V	m	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	CaCl <sub>2</sub>	mg dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	-----	-----	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----	-----	-----	- % -	- % -	-----	-----	mg dm <sup>-3</sup>	-----	-----	-----
Profundidade 0,0–0,2 m																	
Gesso (G)	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	**	*	*	ns
Calcário (C)	**	ns	ns	**	**	**	**	**	ns	**	**	**	**	**	*	ns	ns
G x C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	4,5	18,9	16,4	21,5	12,1	1,01	5,8	26,1	6,8	17,1	22,8	11,6	0,9	27,9	15,9	5,8	7,8
CV <sub>2</sub> (%)	4,6	23,1	24,3	19,2	20,1	2,1	13,4	18,4	10,5	18,9	31,3	13,5	2,1	19,5	9,1	4,5	17,7
Profundidade 0,2–0,4 m																	
Gesso (G)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns
Calcário (C)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	**	ns	ns
G x C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	4,4	25,3	21,9	25,8	5,5	10,0	7,7	8,9	8,5	17,9	40,7	22,2	2,9	12,6	23,4	0,8	6,7
CV <sub>2</sub> (%)	5,9	13,9	14,7	29,6	4,2	7,9	9,4	7,8	5,7	14,0	31,9	10,5	2,5	23,8	13,8	1,1	2,8
Profundidade 0,4–0,6 m																	
Gesso (G)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Calcário (C)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	**	ns	ns
G x C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	16,4	8,2	20,2	7,7	26,8	28,1	11,2	8,7	13,3	15,5	26,6	27,2	16,3	0,2	12,6	1,6	7,7
CV <sub>2</sub> (%)	17,7	12,1	16,2	5,5	27,7	27,3	8,5	6,5	8,3	13,5	26,0	20,1	16,6	0,2	11,7	1,9	7,5

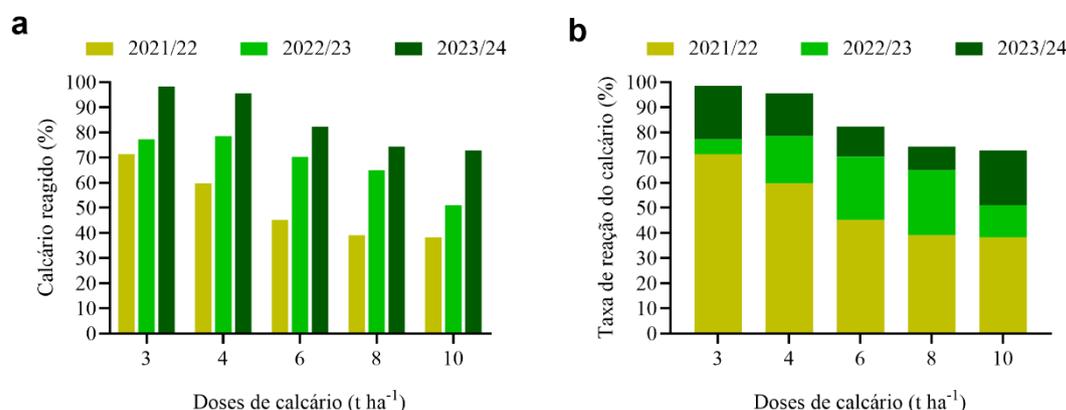
pH = potencial hidrogeniônico; P = fósforo; K = potássio; Ca<sup>2+</sup> = cálcio; Mg<sup>2+</sup> = magnésio; Al<sup>3+</sup> = alumínio; H + Al = acidez potencial; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases; m = saturação por alumínio; S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> = enxofre; B = boro; Cu = cobre; Fe = ferro; Mn = manganês;

Zn = zinco. \* e \*\* = não significativo, significativo a  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$  de probabilidade pelo teste F, respectivamente.  $CV_1$  = coeficiente de variação da parcela;  $CV_2$  = coeficiente de variação da subparcela.

**Apêndice 4.** Concentração de cálcio e magnésio não trocáveis do solo e calcário não reagido (0,00-0,20 m) após a aplicação de doses de calcário e com ou sem gesso nas safras agrícola 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024.

2021/2022				
	Ca-NT	Mg-NT	Ca + Mg-NT	CNR
	----- cmolc dm <sup>-3</sup> -----			%
Gesso (G)	ns	ns	ns	ns
Calcário (C)	**	**	**	**
G x C	ns	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	10,4	4,9	9,0	16,8
CV <sub>1</sub> (%)	9,4	8,7	11,9	11,2
2022/2023				
	Ca-NT	Mg-NT	Ca + Mg-NT	CNR
	----- cmolc dm <sup>-3</sup> -----			%
Gesso (G)	ns	ns	ns	ns
Calcário (C)	**	*	**	*
G x C	ns	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	10,5	12,4	15,9	17,7
CV <sub>1</sub> (%)	15,1	11,4	19,6	21,4
2023/2024				
	Ca-NT	Mg-NT	Ca + Mg-NT	CNR
	----- cmolc dm <sup>-3</sup> -----			%
Gesso (G)	ns	ns	ns	ns
Calcário (C)	**	*	**	**
G x C	ns	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	11,5	8,8	15,9	40,6
CV <sub>1</sub> (%)	9,6	7,3	12,9	40,9

Ca-NT = cálcio não trocável; Mg-NT = magnésio não trocável; Ca + Mg-NT = cálcio e magnésio não trocável; CNR = calcário não reagido. \* e \*\* = não significativo, significativo a  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$  de probabilidade pelo teste F, respectivamente. CV<sub>1</sub> = coeficiente de variação da parcela; CV<sub>2</sub> = coeficiente de variação da subparcela.



**Apêndice 5.** Calcário reagido (a) e taxa de reação do calcário (b) em resposta ao calcário nas safras agrícolas 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024.

**Apêndice 6.** Frações inorgânicas de fósforo do solo (0,00–0,20 m) após a aplicação de doses de calcário e com ou sem gesso nas safras agrícola 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024.

	2021/2022			2022/2023			2023/2024		
	P–Al	P–Fe	P–Ca	P–Al	P–Fe	P–Ca	P–Al	P–Fe	P–Ca
	----- mg g <sup>-1</sup> -----								
Gesso (G)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
Calcário (C)	**	**	*	ns	ns	*	ns	ns	**
G x C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	25,7	19,4	11,5	10,5	6,6	9,7	25,9	25,2	10,4
CV <sub>2</sub> (%)	25,9	22,6	27,5	11,7	11,8	15,3	19,1	29,3	12,3

P–Al = fósforo ligado ao alumínio; P–Fe = fósforo ligado ao ferro; P–Ca = fósforo ligado ao cálcio. \* e \*\* = não significativo, significativo a  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$  de probabilidade pelo teste F, respectivamente. CV<sub>1</sub> = coeficiente de variação da parcela; CV<sub>2</sub> = coeficiente de variação da subparcela.

**Apêndice 7.** Teores foliares de nutrientes na soja após a aplicação de doses de calcário e com ou sem gesso nas safras agrícolas 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024.

	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----g kg <sup>-1</sup> -----						-----mg kg <sup>-1</sup> -----				
	2021/2022										
Gesso (G)	ns	ns	*	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	ns
Calcário (C)	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
G x C	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	27,3	17,6	9,1	17,9	6,2	15,8	7,5	16,5	10,9	14,8	18,7
CV <sub>2</sub> (%)	22,8	12,6	15,9	23,8	17,6	12,4	11,8	34,5	8,3	18,3	20,8
	2022/2023										
Gesso (G)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	**	ns	ns	ns
Calcário (C)	ns	ns	*	**	*	ns	ns	ns	ns	ns	*
G x C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
CV <sub>1</sub> (%)	2,3	5,5	8,4	14,7	5,1	28,4	4,2	12,6	12,8	20,4	18,9
CV <sub>2</sub> (%)	4,3	5,7	12,3	12,2	8,2	20,7	7,0	9,5	19,3	20,1	13,4
	2023/2024										
Gesso (G)	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Calcário (C)	ns	ns	*	**	**	ns	ns	*	*	ns	**
G x C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	5,7	9,2	12,9	5,2	4,9	19,8	9,2	11,2	10,4	7,3	10,2
CV <sub>2</sub> (%)	9,0	7,6	17,1	15,8	16,4	20,1	10,1	16,3	30,8	22,5	13,8

N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; S = enxofre; B = boro; Cu = cobre; Fe = ferro; Mn = manganês; Zn = zinco. ns, \* e \*\* = não significativo, significativo a  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$  de probabilidade pelo teste F, respectivamente. CV<sub>1</sub> = coeficiente de variação da parcela; CV<sub>2</sub> = coeficiente de variação da subparcela.

**Apêndice 8.** Produtividade das culturas após a aplicação de doses de calcário e com ou sem gesso nas safras agrícolas 2021/2022, 2022/2023 e 2023/2024.

	Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )						
	soja 2021/2022	soja 2022/2023	soja 2023/2024	soja Acumulada	milheto 2022/2023	milheto 2023/2024	<i>U. Brizantha</i> 2023/2024
Gesso (G)	ns	ns	ns	ns	**	ns	**
Calcário (C)	**	**	**	**	**	**	*
G x C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV <sub>1</sub> (%)	12,2	6,6	12,3	8,6	4,5	12,9	5,5
CV <sub>2</sub> (%)	8,6	10,7	6,8	3,5	14,6	12,9	25,8

ns, \* e \*\*: não significativo, significativo a  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$  de probabilidade pelo teste F, respectivamente. CV<sub>1</sub> = coeficiente de variação da parcela; CV<sub>2</sub> = coeficiente de variação da subparcela.