

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
COLÉGIO POLITÉCNICO DA UFSM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA DE PRECISÃO

Cristian Negri

**PRODUTIVIDADE DA SOJA INFLUENCIADA POR FONTES DE CÁLCIO  
E ENXOFRE NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Santa Maria, RS  
2023

Cristian Negri

**PRODUTIVIDADE DA SOJA INFLUENCIADA POR FONTES DE CÁLCIO E  
ENXOFRE NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Dissertação apresentada ao curso Mestrado Profissional em Agricultura de Precisão, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Agricultura de Precisão**.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Zucuni Pes

Santa Maria, RS  
2023

Negri, Cristian  
PRODUTIVIDADE DA SOJA INFLUENCIADA POR FONTES DE  
CÁLCIO E ENXOFRE NO SISTEMA PLANTIO DIRETO / Cristian  
Negri.- 2023.  
69 p.; 30 cm

Orientador: Luciano Zucuni Pes  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Colégio Politécnico, Programa de Pós-Graduação em  
Agricultura de Precisão, RS, 2023

1. fontes de calcio 2. corretivo de solo 3. nutrição  
de plantas 4. saturação de bases 5. perfil de solo I.  
Zucuni Pes, Luciano II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, CRISTIAN NEGRI, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Cristian Negri

**PRODUTIVIDADE DA SOJA INFLUENCIADA POR FONTES DE CÁLCIO E  
ENXOFRE NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Dissertação apresentada ao curso Mestrado Profissional em agricultura de Precisão, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Agricultura de Precisão**

Aprovado em 20 de janeiro de 2023.

---

**Luciano Zucuni Pes, Dr. (UFSM)**  
**(Presidente/Orientador)**

---

**Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr. (UFSM)**

---

**Greice Leal Pereira, Dr. (UFV)**

Santa Maria, RS  
2023

*Dedico este trabalho a minha família, Pai, Mae, Irmãos, através do apoio deles e de Deus hoje finalizo este trabalho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, a Deus, que me guiastes com a finalidade de alcançar meus objetivos, durante todos os meus anos de estudos.

Aos meus pais e irmãos, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

Aos meus colegas de turma, por compartilharem comigo tantos momentos de descobertas e aprendizado e por todo o companheirismo ao longo deste percurso.

## RESUMO

### PRODUTIVIDADE DA SOJA INFLUENCIADA POR FONTES DE CÁLCIO E ENXOFRE NO SISTEMA PLANTIO DIRETO

AUTOR: Cristian Negri  
ORIENTADOR: Luciano Zucuni Pes

Embora o cálcio e enxofre sejam nutrientes secundários, eles desempenham papel crítico no crescimento e desenvolvimento das plantas. O presente trabalho objetivou avaliar na cultura da soja o efeito da aplicação via solo dos produtos comerciais Calsite e Force S na construção e manutenção da fertilidade do solo. O ensaio foi conduzido em parceria com a AGRUM Agrotecnologias Integradas Ltda, Santa Maria - RS, em solo, no período de novembro de 2020 a abril de 2021. Utilizou-se o delineamento em blocos casualizados, com seis tratamentos e quatro repetições, totalizando 24 parcelas (7,0 x 4,0 m cada unidade experimental). O trabalho consistiu nos seguintes tratamentos: T1 (Testemunha), T2 (Calsite Perfil, 500 kg ha<sup>-1</sup>), T3 (Calsite Perfil, 1000 kg ha<sup>-1</sup>) e T4 (Calcário, 3100 kg ha<sup>-1</sup>), aplicados à lanço, T5 (Calsite Manutenção / mistura com NPK, 100 kg ha<sup>-1</sup>) e T6 (Force S Manutenção / mistura com NPK, 120 kg ha<sup>-1</sup>), aplicados na linha de semeadura. As doses foram recomendadas por meio da avaliação da análise do solo. Para entender os efeitos dos tratamentos na soja, foram avaliados os seguintes parâmetros: índice de área foliar, altura de planta, número de nós na haste principal, número total de legumes, massa de mil grãos e produtividade. Os dados obtidos foram submetidos a análise da variância no programa SASM-Agri e as médias comparadas pelo teste de Scott-knott (5 %). O tratamento T6 (Force S Manutenção, 120 kg ha<sup>-1</sup>), apresentou maior média nas variáveis índice de área foliar, peso de mil grãos e produtividade. Os tratamentos T5 (Calsite Manutenção, 100 kg ha<sup>-1</sup>) e T2 (Calsite Perfil, 500 kg ha<sup>-1</sup>) apresentaram incremento em relação à testemunha nas variáveis peso de mil grãos e produtividade. Esses resultados demonstram que a nutrição com cálcio e enxofre são primordiais para a obtenção de incrementos produtivos na soja.

**Palavras-chave:** Corretivo de solo. Equilíbrio de bases. Nutrição.

## ABSTRACT

### CALSITE AND FORCE S IN THE LINK BETWEEN THE CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF SOIL FERTILITY AND ITS INFLUENCE ON SOYBEAN CROP

AUTHOR: Cristian Negri  
ADVISOR: Luciano Zucuni Pes

Although calcium and sulfur are secondary nutrients, they play a critical role in plant growth and development. The present study aimed to evaluate the effect of soil application of the commercial products Calsite and Force S, n on soybean. The trial was conducted at AGRUM Agrotecnologias Integradas Ltda, BR Santa Maria - RS, in sandy loam soil, from November 2020 to April 2021. A randomized block design was used, with six treatments and four replications. Totaling 24 plots, each plot contained an area of 7.0 x 4.0 m. The work consisted of the following treatments: T1 (Control), T2 (CP-Calsite profile, 500 kg ha<sup>-1</sup>), T3 (CP 1-Calsite profile, 1000 kg ha<sup>-1</sup>) and T4 (CL-Limestone 3100 kg ha<sup>-1</sup>), applied by broadcast, and treatments T5 (CM-Calsite maintenance-mixture with NPK, 100 kg ha<sup>-1</sup>) and T6 (FS-Force S maintenance-mixture with NPK, 120 kg ha<sup>-1</sup>), applied on the sowing line. The doses were recommended through the evaluation of soil analysis. To understand the effects of treatments on soybean, the following parameters were evaluated: leaf area index, plant height, number of nodes on the main stem at stage R5.1, total number of legumes at stage R8, thousand-grain mass and yield. The data obtained were submitted to analysis of variance in the SASM-Agri program and the means were compared by the Skott-knott test (5%). Treatment T6 (FS Force S Maintenance-120 kg ha<sup>-1</sup>) presented the highest average in the variables leaf area index, thousand-grain weight and productivity. Treatments T5 (CM Calsite Maintenance-100 kg ha<sup>-1</sup>) and T2 (CP Calsite Perfil-500 kg ha<sup>-1</sup>) showed an increase in relation to the control in the variables thousand grain weight and productivity. These results demonstrate that calcium and sulfur are essential in obtaining productive increases in soybeans.

**Keywords:** Soil Concealer. Base of Equilibrium. Nutrition.

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Classificação dos teores de enxofre (S) no solo de acordo os extratores acetato de amônio em ácido acético (NH <sub>4</sub> OAc.HOAc.) e fosfato de cálcico (Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> 500 mg L <sup>-1</sup> ) .....	13
TABELA 2 – Atributos químicos do solo previamente à instalação do experimento....	31
TABELA 3 – Atributos químicos do solo previamente à instalação do experimento....	31
TABELA 4 – Atributos químicos do solo previamente à instalação do experimento....	31
TABELA 5 – Resumo dos tratamentos realizados .....	33
TABELA 6 – Altura (cm), número de nós na haste principal da soja no estádio R5.1 e número de vagens no estádio R8, em resposta a aplicação dos tratamentos na semeadura .....	37
TABELA 7 – Área foliar da cultura da soja no estádio R5.1, peso de mil grãos e produtividade da soja no estádio R8, em resposta a aplicação dos tratamentos na semeadura .....	38
TABELA 8 – Custo operacional dos diferentes tratamentos, considerando os valores de comercialização de janeiro de 2023.....	43
TABELA 9 – Custo-benefício dos tratamentos aplicados .....	43

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
1.1	OBJETIVOS .....	15
1.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	15
1.1.2	<b>Objetivos específicos</b> .....	15
1.2	JUSTIFICATIVA.....	15
1.3	HIPÓTESE .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	17
2.1	ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DA SOJA .....	17
2.2	MANEJOS PARA SOLOS ÁCIDOS: CORRETIVO E CONDICIONADOR .....	18
2.3	RECOMENDAÇÃO PARA CORREÇÃO DO SOLO .....	23
2.4	VISÃO GERAL DO PAPEL DOS MACRONUTRIENTES SECUNDÁRIOS.....	25
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	30
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL .....	30
3.2	INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO ENSAIO.....	32
3.3	TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL .....	32
3.4	AVALIAÇÕES.....	33
3.4.1	<b>Altura de planta</b> .....	33
3.4.2	<b>Área foliar</b> .....	33
3.4.3	<b>Número nós e vagens</b> .....	34
3.4.4	<b>Peso de mil grãos</b> .....	34
3.4.5	<b>Produtividade</b> .....	34
3.4.6	<b>Custo de produção</b> .....	35
3.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	37
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	44
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	45
	<b>APÊNDICE A – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 0 - 10 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO</b> .....	57
	<b>APÊNDICE B – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 0 - 10 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO</b> .....	58
	<b>APÊNDICE C - ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 0 - 10 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO</b> .....	59
	<b>APÊNDICE D – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 10 - 20 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO</b> .....	60
	<b>APÊNDICE E – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 10 - 20 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO</b> .....	61
	<b>APÊNDICE F – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 10 - 20 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO</b> .....	62
	<b>APÊNDICE G – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 20 - 40 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO</b> .....	63
	<b>APÊNDICE H – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 20 - 40 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO</b> .....	64
	<b>APÊNDICE I – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 20 - 40 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO</b> .....	65

<b>APÊNDICE J – APLICAÇÃO FOLIAR DE DEFENSIVOS AGRÍCOLAS PARA O MANEJO DA SOJA.....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE K – DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES, AVALIAÇÕES E FENOLOGIA DA CULTURA DURANTE A CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE L – INCREMENTO DE PRODUTIVIDADE ASSOCIADO À UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA DO CA ASSOCIADO AO SI. TRABALHOS REALIZADOS EM DIVERSAS REGIÕES DO BRASIL, E EM DISTINTOS ANOS AGRÍCOLAS.....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) (Merrill) é a mais importante oleaginosa cultivada no mundo. O panorama geral para safra 2022/23 no Brasil, apresenta área de semeadura 4,5 % superior a safra anterior (40.950,6 mil hectares). Contudo, a produção obtida corresponde à 124.047,8 mil toneladas, valor 2,2 % inferior a safra anterior, resultando em produtividade média de 3.029 kg ha<sup>-1</sup>. Esta queda de produtividade, deve-se em parte ao déficit hídrico que ocorreu em determinadas regiões. Todavia, estimou-se aumento nas exportações do óleo de soja, passando de 1,8 para 2,1 milhões de toneladas, acarretando aumento no esmagamento de grãos. Estas estimativas de elevação são motivadas pelas fortes exportações do óleo de soja no período de janeiro a julho de 2022 (CONAB, 2022).

Visando plantas mais tolerantes às adversidades climáticas e consequentemente, mais produtivas, um fator preponderante é a nutrição equilibrada da cultura. Assim, para seu cultivo, são necessários os seguintes nutrientes: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), estes requeridos em maiores quantidades, e os nutrientes ferro (Fe), cobre (Cu), manganês (Mn), zinco (Zn), boro (B), cloro (Cl), molibdênio (Mo) e níquel (Ni), requeridos em menores quantidades (DOMINGOS *et al.*, 2015). Segundo Zambolim *et al.* (2012) todos os nutrientes são essenciais para as plantas, pois influenciam na sua sanidade, tornando-as mais resistentes às condições de estresses abióticos e bióticos.

O solo é constituído por fatores físicos, químicos e biológicos, sendo o equilíbrio destes importante na obtenção de altas produtividades. Os solos brasileiros são em geral, designados como solos de baixa fertilidade natural, haja vista seu alto grau de intemperismo. Como consequência, estes solos são caracterizados pela acidez e baixa saturação de bases, ou seja, altos teores de hidrogênio (H<sup>+</sup>) e presença de alumínio (Al<sup>3+</sup>), associado a baixos teores de bases trocáveis (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup>) na CTC (Capacidade de Troca de Cátions) do solo (CASTRO *et al.*, 2016).

Nos dias atuais, uma grande problemática nos sistemas de produção está relacionada à presença de Al<sup>3+</sup> e ausência de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> no perfil do solo, situação que impacta diretamente no crescimento radicular (TAMÁS *et al.*, 2006). Plantas com

sistema radicular superficial estão propícias aos impactos advindos dos períodos de veranico, afetando seu crescimento e desenvolvimento. Conseqüentemente, nestes solos, é necessária a prática da correção da acidez do solo e a obtenção do equilíbrio de bases na CTC, visando a melhoria dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo e, portanto, aumento de produtividade (CASTRO *et al.*, 2016).

A utilização de corretivos e condicionadores em solos ácidos são estratégias para obtenção de ambientes propícios ao crescimento e desenvolvimento das plantas, possibilitando atingir altas produtividades. No entanto, mesmo que a calagem possa elevar o pH do solo e contribuir para superar problemas de toxicidade, especialmente de  $Al^{3+}$  nas camadas superficiais, a subsuperfície geralmente permanece inalterada, uma vez que a incorporação profunda do calcário é tecnicamente difícil e onerosa (YANG *et al.*, 2013).

Solos ácidos, além de apresentarem elementos tóxicos, apresentam a fertilidade comprometida, promovendo, portanto, o desequilíbrio nutricional das plantas (QUAGGIO *et al.*, 1993). Portanto, as concentrações equilibradas de Ca e Mg são mais importantes. O uso contínuo de calcário dolomítico, associado ao monocultivo de soja, pode acarretar o estreitamento dessa relação, causando um desequilíbrio iônico entre os cátions (HOLZSCHUUC, 2007).

O solo equilibrado deve apresentar saturação de 50 a 70 % de Ca, 12 a 15 % de Mg e 3 a 5 % de K na CTC do solo (DEMATTÊ, 2011). Além disto, a maioria dos laboratórios de análises de solos também apresentam, nas tabelas de resultados, relações entre nutrientes, como por exemplo, Ca e Mg. Em alguns casos, se preconiza que a relação Ca/Mg deve ser de 3:1 (BENITES *et al.*, 2009), ou valores próximos, inclusive com relações mais estreitas. Entretanto, Ca e Mg, assim como os demais cátions do solo, apresentam diferentes relações de coordenação com a molécula da água. Ambos os cátions, Ca e Mg, são bivalentes, porém o raio iônico hidratado do Ca é menor, em comparação ao Mg. Assim, o Ca é mais retido nos colóides do solo. O K, por ser monovalente, é retido com menor força, comparado ao Ca e Mg (BLOSS, 1971). Em outras palavras, de forma geral, o solo tende a apresentar maior teor de Ca do que de Mg, e este superior ao K.

O S é importante para a cultura da soja. Este nutriente, desempenha importantes funções nas plantas, atuando na formação dos aminoácidos cisteína, cistina e metionina, estando, portanto, presente em todas as proteínas; participa de diversas reações no metabolismo das plantas; participa da formação de lipídeos e compostos voláteis; está presente em coenzimas como a ferredoxina e na formação de nódulos em leguminosas, auxiliando na fixação de N, portanto a relação de N e S para culturas que realizam a simbiose é importante (MALAVOLTA, 1997). O S é dinâmico no solo; a oxidação do S e sulfeto ( $S^{2-}$ ) para sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) acarreta a elevação do pH do solo, já a redução de  $SO_4^{2-}$  a  $S^{2-}$  diminui o pH do solo. A avaliação dos teores de S (Tabela 1) e, conseqüentemente, o posicionamento para sua recomendação, baseia-se no diagnóstico da camada de 20 - 40 cm (subsuperfície), haja vista sua mobilidade no sistema.

Tabela 1 – Classificação dos teores de enxofre (S) no solo de acordo os extratores acetato de amônio em ácido acético ( $NH_4OAc.HOAc.$ ) e fosfato de cálcico ( $Ca(H_2PO_4)_2$  500 mg L<sup>-1</sup>)

Classes	S (mg.dm <sup>-3</sup> )	
	$NH_4OAc.HOAc.$	$Ca(H_2PO_4)_2$ 500 mg L <sup>-1</sup>
Muito Baixo	0,0-0,5	0,0-2,5
Baixo	5,1-10,0	2,5-5,0
Médio	10,1-15,0*	5,1-10,0
Adequado	>15,0	>10,0

\*Nível crítico

Fonte: (VITTI, 1989 apud VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015).

No RS, há grande variabilidade de solos, devido ao material de origem e aos processos de formação, apresentando distintos tipos e teores de argila e teores de matéria orgânica (MO). Esta variabilidade de solos possibilita a obtenção de resposta às aplicações de S. O manejo do solo é preponderante para os teores de S no sistema. Desta forma, no sistema convencional, onde há revolvimento intensivo do solo, que favorece a erosão da camada superficial, além de contribuir para mineralização da MO,

ocorre redução das reservas de S na maioria dos solos gaúchos (Alvarez, 2004). Amostras obtidas em profundidades de 0 - 15 cm, em pesquisa realizada com solos do RS, manejados sob agricultura de precisão, apresentaram teores de S disponível, na solução do solo, de aproximadamente 10 mg dm<sup>3</sup>, ou seja, com possibilidade de resposta à aplicação de S, tendo por objetivo melhorar a qualidade e a produtividade das culturas (SILVA *et al.*, 2013). Ressalta-se que, para a cultura da soja, a exigência de S é em torno de 8,2 kg para cada tonelada de grãos produzida (SFREDO; LANTMANN, 2007).

Em detrimento ao requerimento desses nutrientes, a TMF fertilizantes inteligentes inovou e desenvolveu a tecnologia do Ca associado ao silício (Si). Atuando como uma ferramenta multifuncional, que dentre os diferenciais atrelados a maior eficiência do portfólio, destaca-se o Ca móvel. Assim, possibilita ao produtor atender a sua demanda, seja visando correção e construção do solo ou nutrição da planta. Seu emprego no viés de construção de perfil do solo recorrentemente tem sido utilizado, pois além de permitir que o Ca seja distribuído ao longo do perfil, eleva o pH destas camadas, garantindo ambiente propício ao crescimento radicular. Diferente da aplicação do gesso, que não apresenta potencial corretivo. E no viés nutricional, culturas de ciclo curto requerem o elemento prontamente disponível no sistema para que assim exerça sua função na planta. Isso é garantido pela alta solubilidade dos produtos, diferente do calcário que demanda muita água para se dissociar e assim fornecer Ca e ter ação corretiva. Essas vantagens atreladas ao operacional (rendimento e aplicabilidade) proporciona ao produtor maiores patamares produtivos e rentabilidade.

Considerando a importância da cultura da soja para a economia e a crescente expansão para novas fronteiras agrícolas que, no geral, são caracterizadas por solos de baixa fertilidade natural, bem como a manutenção em áreas de fertilidade construídas têm-se aumentado a demanda por estratégias que estabilizem a produtividade da cultura em diferentes ambientes. Diante dessa realidade, este trabalho teve por objetivo contribuir para a validação de uma estratégia de manejo da fertilidade do solo, através da utilização dos produtos da TMF Fertilizantes na qual possuem uma tecnologia diferenciada do mercado atual como fonte de Ca, Si e S para manutenção da

fertilidade. Desta maneira, justifica-se o estudo da viabilidade técnica da inserção destas tecnologias nas recomendações de cultivo da soja.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Analisar os resultados do Calsite e Isofertil Force S aplicados via solo como agentes de construção e manutenção da fertilidade do solo, na promoção de crescimento e rendimento da soja.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- avaliar os impactos nos parâmetros de fertilidade do solo em camada superficial e subsuperficial;
- avaliar os impactos em parâmetros associados a nutrição e produção de plantas;
- verificar o retorno econômico atrelado ao uso da tecnologia.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Um marco histórico na agricultura foi a consolidação do sistema de plantio direto e seus benefícios no âmbito, físico, biológico e químico do solo. Contudo, a adoção desse sistema ocasionou uma problemática, haja vista, que a aplicação dos corretivos de solo concentra-se na camada superficial. Desta maneira, parte dessas áreas se caracteriza por possuir camada de solo na profundidade de 0-20 cm corrigida ou parcialmente corrigida, gerando uma lacuna no manejo corretivo de camadas mais profundas. Atualmente, pauta-se por uma construção em perfil do solo, especialmente em regiões com histórico de déficit hídrico, onde o sistema radicular limita-se a camadas mais superficiais. Assim, a chave para o desenvolvimento radicular em

profundidade está atrelada ao Ca, bem como pH corrigido em profundidade. Além, de garantir o Ca prontamente disponível para nutrição das plantas.

### 1.3 HIPÓTESE

A aplicação da tecnologia do Ca móvel no perfil do solo, promove melhorias na construção e manutenção da fertilidade do solo nas camadas superficiais e sub superficiais (0 - 20 e 20 – 40 cm), bem como a disponibilidade do nutriente para o requerimento nutricional das plantas, proporcionando assim melhores condições para incremento de produtividade.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DA SOJA

A soja (*Glycine max* L. Merr.) é uma leguminosa originária da região sul da China, que após domesticação, foi introduzida nos EUA e Brasil (LÓPEZ-LÓPEZ *et al.*, 2010). Atualmente, Argentina, EUA e Brasil são os principais países produtores de soja, compreendendo 14, 31 e 37 %, respectivamente, da produção mundial (CONAB, 2021). A grande demanda, principalmente pela China (maior importador), tem permitido aumento progressivo da produção na América Latina (GAZZONI; DALL' AGNOL, 2018). No Brasil, o cultivo da soja teve início na Bahia, em seguida em São Paulo e depois no Rio Grande do Sul, sendo que neste último teve êxito, haja vista a melhor adaptação, devido às condições climáticas serem semelhantes à dos EUA, já que as cultivares eram oriundas daquele país.

A soja é a principal cultura agrícola do Brasil, ocupando mais de 50 % das áreas cultivadas (DEFANTE *et al.*, 2018). Na safra 21/22, a produção da soja foi de 124.047,8 mil toneladas, com produtividade média de 3.029 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2022). A projeção, até a safra 26/27, é um acréscimo de aproximadamente quatro milhões de hectares na área cultivada de soja, em relação à safra atual, podendo chegar a cerca de 44 milhões de hectares. Em relação à produção, projeta-se, para o mesmo período, aumento de 14,3 % em relação à safra 20/21, com previsão de atingir 146,5 milhões de toneladas (CONAB, 2022).

O cultivo de soja, no Brasil, ocorre em todas as regiões (Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e Norte), com destaque para os Estados do Mato Grosso, Goiás, Paraná e Rio Grande do Sul, responsáveis por aproximadamente 70 % da produção. O Estado do Mato Grosso é o maior produtor brasileiro de soja, com quase 41 milhões de toneladas, em uma área plantada de mais de 11 milhões de hectares. Em seguida, destacam-se os estados de Goiás, Paraná e Rio Grande do Sul, que no ano de 2022 produziram 17,4, 12,3 e 9,1 milhões de toneladas de soja, respectivamente.

No Rio Grande do Sul, a área cultivada com soja na safra 21/22 cresceu 1 % em relação à safra anterior, atingindo 6,36 milhões de hectares, com produtividade média de 1.430 kg ha<sup>-1</sup>, bem inferior à safra anterior, de 3.430 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2022). Essa

perda em produção foi decorrente da estiagem e das altas temperaturas em todas as regiões gaúchas (CONAB, 2022).

A soja apresenta múltiplos usos no mercado interno e externo, seja *in natura*, como farelo e óleo para nutrição animal (para monogástricos – aves e suínos) ou humana, até para a produção de biocombustíveis (biodiesel). A soja é cultivada como fonte de proteína e óleo de alta qualidade e baixo custo (ISLAM *et al.*, 2022). Em média, o grão da soja possui na sua composição 40 % de proteína, 20 % de lipídeos, 5 % de minerais e 34 % de carboidratos (ISLAM *et al.*, 2022). Devido a toda sua variabilidade de uso e valor nutritivo, representa importante *commodity* agrícola (SILVA *et al.*, 2014).

No entanto, a produtividade da soja é acometida por diversos estresses abióticos, como temperaturas extremas, salinidade, acidez do solo, metais pesados, alagamento e ocorrência de períodos de seca (DONG *et al.*, 2019; KUNERT; VORSTER, 2022). Sob o ponto de vista de manejo do solo, é necessário dispor de estratégias que visem minimizar as perdas de produtividade da soja frente à seca. Neste viés, a construção do perfil do solo proporciona condições adequadas às plantas, para que elas desenvolvam sistema radicular mais profundo, de forma que as raízes possam explorar melhor o ambiente. Assim, o reservatório de água não se limita à camada superficial do solo (0 a 20 cm). E nesse viés é preponderante a neutralização da acidez e a presença de cálcio e magnésio em níveis adequados no perfil do solo.

## 2.2 MANEJOS PARA SOLOS ÁCIDOS: CORRETIVO E CONDICIONADOR

No Brasil, grande parte dos solos cultiváveis é caracterizada pela acidez, ou seja, baixos valores de pH ( $\text{pH} < 5,5$ ), elevados teores de alumínio trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) e deficiência de bases trocáveis – cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ) (MEDA *et al.*, 2002; SOTI *et al.*, 2015; OSMAN, 2018). Solo de caráter ácido é um dos fatores mais limitante da produtividade agrícola (FAGÉRIA; NASCENTE, 2014; MENG *et al.*, 2019).

A acidificação do solo deve-se à remoção de bases e a ocupação das cargas negativas dos sítios de ligação dos colóides do solo por  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ . O processo de acidificação pode ser causado naturalmente, devido à pobreza do material de origem

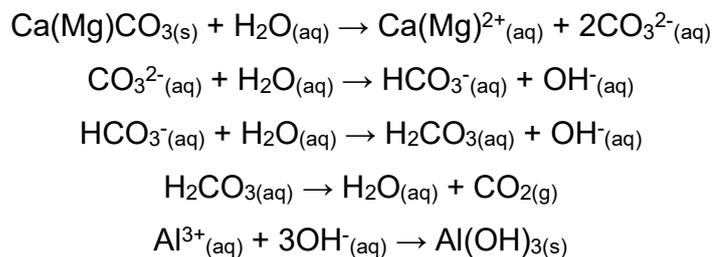
em cátions básicos, precipitação ácida, deposição atmosférica de gases ou partículas acidificantes, mineralização da matéria orgânica, absorção de cátions pelas culturas, com consequente exsudação de  $H^+$  para solução do solo e, também, ocorrer devido à aplicação de fertilizantes acidificantes, como nitrogenados (ureia e amoniacais) e sulfurados (enxofre elementar) (LI *et al.*, 2019). Solos ácidos reduzem a disponibilidade de vários nutrientes fundamentais, tais como, o fósforo (P), Mg e o Ca, além de aumentar o nível de toxicidade de outros elementos, como por exemplo, o  $Al^{3+}$ , alterando inúmeras reações químicas e biológicas no solo (SUMNER; NOBLE, 2003; COSTA *et al.*, 2018). A presença do Al na solução do solo gera uma barreira química ao desenvolvimento radicular. Sua ação ocorre na região meristemática das raízes, que resulta na inibição do alongamento celular. Assim, fenotipicamente, as raízes engrossam e apresentam ramificações secundárias escuras, pela oxidação de compostos fenólicos e ausência de pelos absorventes (PEIXOTO *et al.*, 2007).

Em resposta à contínua acidificação dos solos, o uso de práticas alternativas de manejo, que possam efetivamente aliviar esse efeito e manter a produtividade das culturas, são necessárias. A calagem é uma estratégia amplamente empregada há séculos no viés de mitigar a acidificação do solo, por meio do aumento do pH, fornecimento de cátions básicos trocáveis (Ca e Mg) e redução dos teores de Al, tornando o ambiente mais propício ao desenvolvimento vegetal (CONNOR *et al.*, 2011; KUNHIKRISHNAN *et al.*, 2016; MENG *et al.*, 2019; BOSSOLANI *et al.*, 2020).

Dentre os corretivos de acidez, o calcário dolomítico ( $CaMg(CO_3)$ ) ocupa lugar de destaque entre os produtores rurais, haja vista sua alta disponibilidade, facilidade de aquisição e baixo custo. O calcário é uma rocha sedimentar, formado, principalmente, pelos minerais calcita e dolomita. A calcita é composta, predominantemente, por carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ), enquanto a dolomita, por carbonato de magnésio ( $MgCO_3$ ). O calcário calcítico apresenta teor de magnésio inferior a 5 % ( $MgO < 5\%$ ), enquanto o calcário dolomítico possui teor de magnésio superior a 12 % ( $MgO > 12\%$ ). O calcário dolomítico é amplamente utilizado na maior parte do território brasileiro, pois apresenta boa relação Ca:Mg, o que atende de forma satisfatória às plantas. Porém, para se realizar uma calagem correta, deve-se realizar previamente a análise de solo e indicar o material mais adequado, para não haver prejuízos. O Brasil utiliza uma

quantidade ainda pequena de corretivos, em relação ao recomendado, conforme a relação adequada corretivo: fertilizante, que seria de 4:1. Porém o que está ocorrendo é inferior ao indicado, já que a relação é próxima a 1:1. Nos dias atuais, os fertilizantes têm ficado cada vez mais onerosos para o agricultor e a correção do solo tem sido vantajosa, já que potencializa a eficiência do fertilizante.

A reação de neutralização da acidez é mostrada abaixo:



Inicialmente, há dissociação dos cátions Mg e Ca, bem como a formação de íon bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), o qual atua como receptor de prótons, na medida que recebe íons  $\text{H}^+$ . Este é convertido em água e gás carbônico, neutralizando a acidez ativa, aumentando o pH. A quantidade de  $\text{H}^+$  na solução é muito pequena, porém, o equilíbrio entre a fase sólida e a líquida, fornece novos  $\text{H}^+$ , gerando maior dificuldade de neutralização, fato este relacionado ao poder tampão do solo (RAIJ, 2011; CAIRES, 2016). Estima-se que  $5 \text{ kg ha}^{-1}$  de calcário seria suficiente para neutralizar a acidez ativa de qualquer solo, por mais ácido que fosse, caso não existisse o poder tampão (ERNANI, 2004). Assim, para a mesma mudança necessária de pH, solos com baixa capacidade tampão, como os de textura arenosa, requer menos calcário do que aqueles com capacidade tampão mais alta, como solos argilosos. Com aumento do pH e fornecimento de Ca e Mg, a retenção destas bases no complexo de troca do solo é favorecida e o Al é deslocado para a solução do solo. O Al sofre hidrólise, transformando-se em uma forma indisponível, o hidróxido de alumínio ( $\text{Al(OH)}_3$ ).

A reatividade e ação neutralizante dos corretivos estão relacionadas diretamente com a área de contato e a umidade do solo. Assim, partículas mais grosseiras (menor área superficial específica) reagem lentamente no solo, podendo apresentar maior poder residual, em relação aos calcários mais finamente moídos (QUAGGIO, 2000).

Sendo assim, um calcário de menor granulometria terá reação mais rápida no solo, desde que o solo esteja úmido (BORTOLUZZI *et al.*, 2014). A calagem pode ser realizada durante todo o ano, porém a aplicação do calcário deve ser realizada com maior prazo possível da data de plantio, uma vez que demanda tempo (em torno de três a seis meses), para reagir de forma eficaz.

No sistema plantio direto, a utilização do calcário possui algumas limitações, destacando-se a baixa solubilidade em água e a limitada mobilidade do Ca no perfil, haja vista que a reação ocorre muito próxima ao local de aplicação, restringindo os efeitos de correção nas camadas mais superficiais do solo (SORATTO; CRUSCIOL, 2008; CAIRES *et al.*, 2015). Neste sistema, a manutenção da palhada na superfície do solo e movimentação mínima, apenas no sulco de semeadura, impossibilita incorporar mecanicamente o produto em profundidade, sem romper a essência do sistema (NATALE *et al.*, 2007). Assim, a translocação descendente das partículas de calcário no solo é altamente dependente do tempo, frequência de aplicação, tipo de solo, clima e manejo da cultura (RHEINHEIMER *et al.*, 2018; AULER *et al.*, 2019; BOSSOLANI *et al.*, 2020; RHEINHEIMER *et al.*, 2000).

Em complemento a calagem, o gesso – sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), um sal neutro, vem sendo utilizado como condicionador das propriedades físicas, físico-químicas e/ou biológicas do solo, sendo este utilizado para a melhoria da fertilidade das camadas subsuperficiais, devido à sua maior solubilidade (cerca de 180 vezes mais solúvel) e mobilidade no perfil, quando comparado ao calcário. O gesso pode ser encontrado nas formas de gipsita e gesso agrícola. O mineral gipsita é encontrado em rocha sedimentar, originária da evaporação de antigos oceanos (OLIVEIRA *et al.*, 2012). Por outro lado, o gesso agrícola é um produto secundário da fabricação de fertilizantes fosfatados, sendo obtido da reação do ácido sulfúrico sobre a rocha fosfática, produzindo ácido fosfórico (VITTI *et al.*, 2008).

Após a dissociação do gesso, o Ca proveniente do produto pode reagir no complexo de troca do solo, deslocando Al, K e Mg para a solução, que podem, por sua vez, reagir com o sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), formando  $\text{AlSO}_4^+$ , forma menos tóxica de Al às plantas, e os pares iônicos neutros: sulfato de potássio ( $\text{K}_2\text{SO}_4^0$ ), sulfato de magnésio ( $\text{MgSO}_4^0$ ) e sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4^0$ ), os quais apresentam grande mobilidade no perfil

(RAMPIM *et al.*, 2011). Porém, ao contrário do que acontece com o ânion carbonato, proveniente do calcário, o  $\text{SO}_4^{2-}$  não recebe prótons, o que faz com que o pH do solo não se altere (RAIJ, 2008; NEIS *et al.*, 2010).

Entre os efeitos atrelados à ação dos corretivos e dos condicionadores de solos, destacam-se o rompimento da barreira química do perfil do solo, representada, pela presença de Al e/ou deficiência de Ca. Assim, cria-se um ambiente favorável ao desenvolvimento radicular em profundidade. Por conseguinte, as raízes são capazes de explorar maiores volumes de solo, aumentando a disponibilidade de água para as culturas, minimizando os efeitos prejudiciais gerados por veranicos, além de aumentar a eficiência na aquisição de nutrientes (NUERNBERG *et al.*, 2002; SOBRAL *et al.*, 2009; CUNNINGHAM, 2020).

No entanto, outros materiais podem ser aplicados para correção da acidez, desde que o produto seja constituído por componentes neutralizantes, como óxidos, hidróxidos, carbonatos e silicatos de cálcio e/ou magnésio. Com a evolução tecnológica, os calcários tornaram-se mais reativos. O óxido de cálcio (CaO), oriundo do processo de calcinação do calcário, utilizado para correção do solo, é um material mais reativo, sendo possível aplicá-lo mais próximo ao plantio (1 a 2 meses). Todavia, sua utilização barra em questões pautada pela agricultura regenerativa. Isso se deve à reação do CaO com a água, caracterizada por uma reação exotérmica, que resulta em aquecimento (SMITH *et al.*, 1998). Assim, ocorre impacto na comunidade microbiana do solo, na atividade metabólica da raiz e outros processos químicos do solo.

A TMF Fertilizantes Inteligentes possui a tecnologia exclusiva do Ca móvel. O mineral  $\text{CaCO}_3$  (mais intemperizado – Escala de Mohs) é inserido no sistema juntamente com molécula de óxido de silício e submetido a altas pressões. Nessa reação, forma-se o Ca associado ao Si, Ca elementar prontamente absorvido pela planta. Essa associação gera uma molécula neutra, com a capacidade de mobilidade no perfil do solo, além de grande quantidade de moléculas de oxigênio provenientes e resultantes do processo de transformação da tecnologia. Além disso, o Si, elemento benéfico, é fornecido ao solo. Neste sentido, muitos trabalhos têm associado o Si à eficiência do uso da água, por diminuir as perdas por evapotranspiração (MA; YAMAJI, 2006) e aumento da tolerância a pragas e doenças (BAKHAT *et al.*, 2018).

## 2.3 RECOMENDAÇÃO PARA CORREÇÃO DO SOLO

Existem diferentes métodos para avaliar a necessidade de calagem do solo, sendo variáveis de acordo com os princípios analíticos envolvidos. As recomendações de calagem nos principais estados do Brasil fundamentam-se no conhecimento de especialistas, os quais desenvolveram tabelas de interpretação e recomendação nos diferentes manuais de recomendação publicados. Dentre os métodos utilizados para estimar a necessidade de calagem destacam-se o Índice SMP, o método da saturação por bases e o método baseado na neutralização do  $Al^{3+}$  e suprimento de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  (QUAGGIO, 1993; QUAGGIO, 2000; CAMPANHARO *et al.*, 2007).

Entre as principais metodologias de recomendação de calcário, o Índice SMP, usualmente empregado nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, consiste em determinar o pH das amostras de solo em solução tamponada a pH 7,5, denominada SMP (SHOEMAKER, MACLEAN e PRATT) (SHOEMAKER *et al.*, 1961). O SMP é utilizado para recomendar a quantidade de calcário necessária para elevar o pH do solo a valores de 5,5, 6,0 ou 6,5, dependendo da cultura e/ou sistema de cultivo. Quanto menor o valor do SMP do solo, maior será a acidez potencial, ou seja, maior o poder tampão ( $H+Al$ ) e, portanto, maior será a necessidade de calcário para correção. É considerado um método eficiente, barato, rápido e de elevada correlação com os valores da necessidade de corretivos obtidos na incubação do solo com  $CaCO_3$  (QUAGGIO, 1983). O método SMP é bem adaptado para solos com pH menor que 5,8; teor de matéria orgânica menor que 10 % e elevada quantidade de  $Al^{3+}$  (MCLEAN *et al.*, 1966), características comuns dos solos do RS. Contudo, a limitação deste método se deve ao uso restrito à determinadas regiões, pois exige curvas de calibração específica para cada tipo de solo, feitas através da relação do poder tampão do solo com o Índice SMP da amostra (KAMINSKI *et al.*, 2002). Isso evidencia a influência de características específicas dos solos de cada região, especialmente aquelas relacionadas ao poder tampão do solo, como teor de matéria orgânica, textura, tipo e quantidade de minerais da fração argila e pH (ESCOSTEGUY; BISSANI, 1999).

Um dos métodos mais simples para determinar a necessidade de calagem foi desenvolvido em Minas Gerais e é baseado na neutralização do  $Al^{3+}$  e elevação dos

teores trocáveis de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  (ALVAREZ; RIBEIRO, 1999; FULLIN, 2001). Este método foi desenvolvido em decorrência do  $\text{Al}^{3+}$  ser considerado um dos principais componentes relacionados à acidez. Além disso, a maior parte dos solos brasileiros são naturalmente ácidos, apresentando altos teores de  $\text{Al}^{3+}$  (CIOTTA *et al.*, 2004; RAIJ, 2011). Portanto, o objetivo deste método é eliminar ou reduzir o  $\text{Al}^{3+}$  a teores não tóxicos às plantas (ALVAREZ; RIBEIRO, 1999; FULLIN, 2001). Modificações deste método levam em consideração fatores que estimam a capacidade tampão do solo (resistência do solo às variações de pH), como teor de argila, exigência das culturas em  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e tolerância das culturas à acidez do solo (ALVAREZ; RIBEIRO, 1999; FULLIN, 2001). Assim, indiretamente, utilizando o poder tampão do solo, considera-se que solos mais argilosos apresentam maior necessidade de calcário do que solos arenosos (valor "Y"). De acordo com Alvarez e Ribeiro (1999), a fórmula utilizada é:

$$\text{NC (Mg ha}^{-1}\text{)} = \text{Y} [\text{Al}^{3+} - (\text{mt.t}/100)] + [\text{X} - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})]$$

Onde,

NC = Necessidade de calcário;

Y = capacidade tampão da acidez do solo, definida de acordo com a textura do solo ou fósforo remanescente. No caso do teor de argila, a capacidade tampão varia, através do valor Y, de 1 a 4, de um solo arenoso para um solo argiloso;

$\text{Al}^{3+}$  = acidez trocável, em  $\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$ ;

mt = saturação máxima por  $\text{Al}^{3+}$  tolerada pela cultura, que varia de 20 % para as culturas de feijão e soja e 15 % para o milho;

t = capacidade de troca catiônica efetiva, em  $\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$ ;

X = teores de Ca e Mg trocáveis requerida por cultura, sendo  $2 \text{ cmol}_c\text{dm}^{-3}$  para as culturas anuais (feijão, milho e soja).

Dentre as críticas ao método, têm-se que a metodologia considera a exigência de apenas  $2 \text{ cmol}_c\text{dm}^{-3}$  de Ca + Mg pelas culturas anuais (valor X da fórmula), sendo que, atualmente, as lavouras com altas produtividades apresentam maiores exigências de nutrientes. Para solos argilosos do cerrado, com CTC acima de  $7 \text{ cmol}_c\text{dm}^{-3}$ , sugere-se considerar como "X adequado", o valor de 5 (Ca e Mg = 4,0 e 1,0  $\text{cmol}_c\text{dm}^{-3}$ ). Também seria necessária a adição da matéria orgânica nos cálculos, haja vista ser uma das principais responsáveis pela capacidade tampão dos solos.

Por sua vez, o método da saturação por bases (V %), desenvolvido no estado de São Paulo, baseia-se na relação entre o pH do solo e a saturação por bases, que indica o quanto da CTC está ocupada por cátions básicos (Ca, Mg e K). Desta forma, considera a quantidade de calcário necessária para elevar o V % a valores adequados às culturas (RAIJ *et al.*, 1997; FAGERIA, 2001), tornando o método bastante flexível, podendo ser adaptado de acordo com a exigência de cada cultura. Portanto, o uso adequado desse método exige que se conheça o valor de V % ideal para cada cultura.

Na fórmula são considerados parâmetros referentes ao solo, ao corretivo e a cultura desejada. Sendo assim, a fórmula utilizada, segundo Raij *et al.* (1997) é:

$NC = T (Ve - Va) / PRNT$  em que:

$T = CTC_{pH 7}$ ;

Va = Saturação por bases atual do solo;

Ve = Saturação por bases desejada;

PRNT= Poder Relativo de Neutralização Total do calcário, em %.

Todavia, essas recomendações não consideram um fator importante, que se refere ao equilíbrio de bases no complexo de troca do solo (CTC), pois o desbalanço pode comprometer a produtividade das culturas. Considera-se valores em equilíbrio entre 40 a 70 %, 10 a 20 % e 3 a 5 % de Ca, Mg e K, respectivamente, na CTC do solo. É importante salientar que o método mais adequado a se utilizar será o que propicie ao solo um ambiente mais favorável ao desenvolvimento das plantas.

## 2.4 VISÃO GERAL DO PAPEL DOS MACRONUTRIENTES SECUNDÁRIOS

O Ca é um cátion bivalente, que desempenha papel crucial no crescimento e desenvolvimento das plantas. De forma simplista, os seres humanos necessitam de Ca para construir ossos fortes. Desta maneira, dieta deficitária deste nutriente leva à ocorrência de ossos frágeis ou osteoporose. Já as plantas precisam de Ca para proporcionar estabilidade e extensibilidade à parede celular, por meio da formação de ligações cruzadas com polissacarídeos, como as pectinas, enquanto o meio deficiente neste nutriente pode ocasionar o enfraquecimento da parede e a ruptura da membrana

(HO; WHITE, 2005; HOCKING *et al.*, 2016), fatos que justificam a grande proporção de Ca na parede celular.

Desta maneira, o Ca apresenta dupla função, tanto como componente estrutural das paredes e membranas celulares, quanto como mensageiro secundário intracelular, importantíssimo na retransmissão de sinais externos para o núcleo e outros compartimentos celulares, frente a condições adversas, promovendo respostas celulares (WHITE; BROADLEY, 2003; MCAINSH; PITTMAN, 2009). A amplitude e frequência da oscilação da concentração de Ca citosólico, encontrado na faixa micromolar ( $\sim 0.1 \mu\text{M}$ ) é importante para retransmitir a especificidade da mensagem (WHITE, 2001; MCAINSH; PITTMAN, 2009; GILLIHAM *et al.*, 2011).

O equilíbrio necessário entre as funções duais do Ca influencia na sua absorção, distribuição e armazenamento na planta. O Ca é absorvido pelas plantas na forma iônica de  $\text{Ca}^{2+}$ . O contato íon-raiz se dá via fluxo de massa e, posteriormente, entra no espaço apoplástico, dentro da raiz, sendo absorvido, ao longo das pontas das raízes ou regiões onde as barreiras apoplásticas são interrompidas. Devido a este fato, este nutriente deve estar bem distribuído ao longo do perfil do solo, para que haja absorção mais eficaz e desenvolvimento radicular mais vigoroso (QUAGGIO, 2000). O Ca absorvido pode ser utilizado pelas células da raiz e/ou transportado via xilema, através da corrente transpiratória, para a parte aérea da planta. Taxa de transpiração mais alta nas folhas resultam em fluxo no xilema e alocação de Ca para esse órgão, em vez do fruto. A remobilização do Ca via floema é mínima, indicando que sua distribuição interna é dependente do xilema (GILLIHAM *et al.*, 2011).

Associada à baixa mobilidade nas plantas, os sintomas de deficiência visual de Ca ocorrem nos pontos novos de crescimento da raiz e do caule. Além disso, ocasiona queda de flores e diversos distúrbios em frutos (SAURE, 2005; FREITAS; MITCHAM, 2012). Plantas dicotiledôneas (como a soja) têm maior exigência de cálcio (0,5 a 2,0 % da matéria seca), do que plantas monocotiledôneas (milho e gramíneas) (0,3 a 1,25 %), sendo, portanto, mais propensas a apresentar deficiência e distúrbio de Ca (St. JOHN *et al.*, 2013).

O Mg também é crucial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, haja vista o papel direto nos processos fisiológicos e bioquímicos (GRANSEE; FÜHRS,

2013; CAKMAK 2013; VERBRUGGEN; HERMANS, 2013; CHEN *et al.* 2018). Por muito tempo, o Mg foi considerado um elemento esquecido na produção agrícola, mas seu papel vital está sendo cada vez mais reconhecido na nutrição vegetal (CAKMAK; YAZICI, 2010). Em razão do Mg exercer uma série de funções-chave nas plantas, sendo conhecido há tempo por seu papel como átomo central da molécula de clorofila (CAKMAK; KIRKBY, 2008), 13 a 35 % do Mg total da planta está localizada nos cloroplastos (CAKMAK; YAZICI, 2010).

Por outro lado, o Mg celular atua como cofator ou ativador alostérico para uma ampla gama de enzimas. A ribulose1,5-bifosfato carboxilase (Rubisco), enzima mais abundante na terra e primordial no processo fotossintético, é ativada por Mg. Além disso, o Mg é crítico para o processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN), pois a fixação de N<sub>2</sub> através da nitrogenase requer Mg-ATP (SEEFELDT *et al.*, 2009). E, por fim, atua na redistribuição de fotoassimilados da fonte para os drenos (GOUT *et al.*, 2014; CEYLAN *et al.*, 2016).

O contato íon-raiz se dá via fluxo de massa e, sua absorção pelas plantas, ocorre na forma iônica de Mg<sup>2+</sup>. Após absorvido, o Mg é transportado a longa distância pelo xilema, da raiz para a parte aérea, via fluxo transpiracional. Por ser móvel no floema, é translocado para partes de crescimento ativo da planta (WHITE; BROADLEY, 2008). Em detrimento dessa mobilidade nas plantas, os sintomas de deficiência ocorrem primeiro em folhas velhas (BILLARD *et al.*, 2016). Em geral, amarelecimento, na forma de clorose internerval em folhas, é um dos sintomas mais comuns de deficiência de Mg em plantas (CAKMAK; KIRKBY, 2008; MENGUTAY *et al.*, 2013).

A resposta precoce das plantas à deficiência de Mg está correlacionada ao acúmulo de carboidratos nas folhas velhas, resultando no crescimento reduzido das raízes, devido ao fornecimento restrito de carboidratos para as raízes (CAKMAK; YAZICI, 2010; YANG *et al.*, 2012). Tendo em vista o papel decisivo do Mg, é de suma importância manter a nutrição adequada deste nutriente durante o crescimento e desenvolvimento das plantas.

O S, assim como o Ca e o Mg, são elementos críticos para o metabolismo, crescimento e desenvolvimento das plantas. O S é necessário para a síntese dos aminoácidos cistina, cisteína e metionina, os quais constituem proteínas, vitaminas

(biotina e tiamina), hormônios, enzimas, clorofila e lipídeos (FIORINI *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2020; NAKAI; MARUYAMA-NAKASHITA, 2020). Aproximadamente 90 % do S presente na planta é encontrado nesses aminoácidos. A cisteína é o primeiro produto orgânico gerado a partir do S, sendo usado como precursor para sintetizar uma variedade de compostos contendo S, com importantes funções biológicas. Portanto, o S desempenha papel importante na fotossíntese e respiração. Além disso, este nutriente está envolvido na formação de ligações dissulfeto, na regulação de proteínas e enzimas, particularmente no controle redox, oferecendo, portanto, proteção contra danos oxidativos (AARABI *et al.*, 2020). Apesar do papel importantíssimo do S, seu uso é muito subestimado na agricultura (PALMER *et al.*, 2001).

O S é suprido às raízes na forma de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), por fluxo de massa (TEMAN; DIETZ, 2019). O  $\text{SO}_4^{2-}$  é absorvido ativamente pelas raízes das plantas, sendo transportado através do xilema para as folhas, onde sofre, nos plastídios (principalmente nos cloroplastos) (MARUYAMA-NAKASHITA, 2017; CHAN *et al.*, 2019, TAKAHASHI, 2019), redução e incorporação a formas orgânicas, que são então redistribuídas para órgãos dreno, via floema (THOMPSON *et al.*, 1986; KOPRIVA, 2006; TAKAHASHI *et al.*, 2011).

Quando expostas à deficiência de S, as plantas alteram diversos processos metabólicos e fisiológicos. Assim, a deficiência leva ao amarelecimento e à clorose das folhas, inibição da síntese proteica, decréscimo nos conteúdos de clorofila e Rubisco, com consequente redução da fotossíntese e do crescimento das plantas (RESURRECCION *et al.*, 2001). Resumidamente, a deficiência de S é caracterizada pela clorose uniforme nas folhas mais jovens, visto que é um elemento de baixa mobilidade. Posteriormente, este sintoma torna-se generalizado na planta, com redução no crescimento e acúmulo de antocianina, indicando que os tecidos mais velhos não podem contribuir para o suprimento de S aos tecidos novos, os quais são dependentes do nutriente absorvido pelas raízes (SCHERER, 2001; FIORINI *et al.*, 2017).

A deficiência de S resulta ainda na baixa qualidade e rendimento das culturas (ETIENNE *et al.*, 2018; HOUHOU *et al.*, 2018; HENRIET *et al.*, 2019; FUENTES-LARA *et al.*, 2019). O conteúdo de aminoácidos contendo S nas plantas é um índice importante para avaliar a qualidade da cultura. A deficiência de S reduz a proporção de

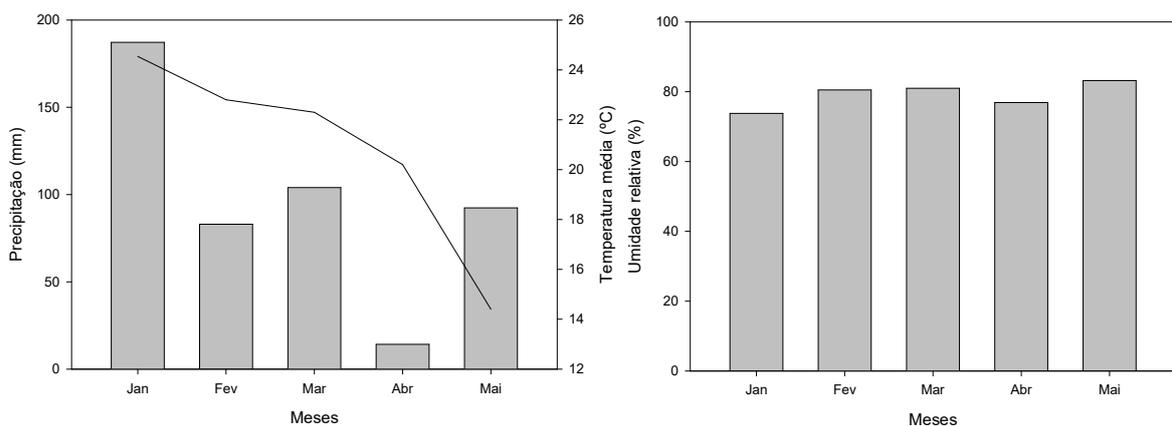
aminoácidos contendo S nos grãos das culturas, enquanto a aplicação de S aumenta o conteúdo de proteínas contendo S, aumentando assim o valor nutricional dos grãos (BLAKE-KALFF *et al.*, 2000; YU *et al.*, 2018). Com o cultivo intensivo da soja, a falta de S torna-se um fator limitante para a cultura. A nutrição com S é crítica para a soja, visto que o S é demandado mais do que em outras culturas, na qual há grande interesse no acúmulo de proteína na semente, que tem recebido atenção do mercado mundial, em especial da China. Portanto, a adubação com S é instrumento fundamental para aumentar o teor de compostos essenciais nos tecidos vegetais.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O presente trabalho foi conduzido na safra 20/21, na Estação Experimental AGRUM Agrotecnologias Integradas LTDA., localizada no município de Santa Maria – RS (29°43' S; 53°33'W; 79 m de altitude). O clima da região, de acordo com Köppen, é do tipo Cfa, caracterizado como subtropical úmido, com precipitação média anual de 1838 mm. A temperatura média anual é de 19° C. Ao longo do período experimental foram registrados os dados meteorológicos (Figura 1).

Figura 1 – Variáveis meteorológicas observadas durante o período experimental no local de estudo. Precipitação (mm); Temperatura Média (°C) e Umidade Relativa e Média



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho Distrófico arênico (EMBRAPA, 2013). São solos característicos de áreas de relevo plano a suavemente ondulado, profundos e com má drenagem.

Antes da semeadura da soja, foi realizada amostragem de solo nas camadas de 0 - 10, 10 - 20 e 20 - 40 cm de profundidade (Tabela 2, 3 e 4). Nestas amostras foram determinados os seguintes atributos do solo: pH em água; Ca, Mg e Al trocáveis, extraídos com solução de KCl 1 M L<sup>-1</sup> (TEDESCO *et al.*, 1995); CTC potencial,

determinada por meio de solução tampão SMP (QUAGGIO *et al.*, 1985); S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, extraído com CaHPO<sub>4</sub> 500 M L<sup>-1</sup> (TEDESCO *et al.*; 1995); P, K, Na, Cu, Zn e B foram determinados pela extração com Mehlich-1 (TEDESCO *et al.*, 1995).

Tabela 2 – Atributos químicos do solo previamente à instalação do experimento.

Tratamento	pH água	Ca	Mg	Relação Ca/Mg	Al	H+Al	Saturação (%)		Índice SMP
		cmol dm <sup>-3</sup>			cmol dm <sup>-3</sup>		Al	Bases	
0-10 cm	6,1	11,2	3,6	3,1	0,0	2,3	0,0	86,8	6,6
10-20 cm	4,9	8,4	2,4	3,5	0,7	4,8	5,9	69,5	5,9
20-40 cm	5,1	5,9	1,8	3,3	0,6	3,0	7,1	72,6	6,3

“pH em água 1:1; Ca, Mg e Al trocáveis com KCl 1M e CTC a pH 7,0” (Bibliografia: Boletim Técnico 05 Tedesco *et al.*, 1995). Índice SMP (Bibliografia: Solução Tampão TSM: Toledo, J. 2011).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Tabela 3 – Atributos químicos do solo previamente à instalação do experimento

Tratamento	MO	S	P-Mehlich	K	CTC pH7	K
	%	mg dm <sup>-3</sup>		cmol dm <sup>-3</sup>		mg dm <sup>-3</sup>
0-10 cm	1,5	10,6	12,5	0,3	17,4	119,5
10-20 cm	0,7	23,7	7,3	0,2	15,9	98,8
20-40 cm	0,2	18,6	1,2	0,2	10,8	56,6

“MO determinada pelo método de digestão úmida; S-SO<sub>4</sub> extraído com CaHPO<sub>4</sub> 500 mg L<sup>-1</sup> e P e K determinados pelo método do Mehlich I.” (Bibliografia: Boletim Técnico nº 5, Tedesco *et al.*, 1995).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Tabela 4 – Atributos químicos do solo previamente à instalação do experimento

Tratamento	Cu	Zn	B	Relações Molares			
	mg dm <sup>-3</sup>			K/CTC	Ca/CTC	Mg/CTC	(Ca + Mg)/K
0-10 cm	1,8	1,2	X	1,8	64,4	20,7	48,4
10-20 cm	1,3	0,8	0,3	1,6	52,8	15,1	42,7
20-40 cm	1,0	0,5	0,2	1,3	54,6	16,7	53,1

“Cu, Zn e B extraídos com Mehlich I.” (Bibliografia: Manual de Análises Químicas de Solo. Plantas e Fertilizantes. Embrapa, 2009).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

### 3.2 INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO ENSAIO

A adubação da área experimental foi realizada no sulco de semeadura e consistiu na aplicação de 261 kg ha<sup>-1</sup> de adubo NPK, com formulação 5-20-20, ou seja, fornecendo ao sistema 13,05 kg ha<sup>-1</sup> de N, 52,2 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 52,2 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, conforme recomendação baseada na análise de solo.

No período que antecedeu a semeadura (2 horas antes), realizou-se o tratamento de sementes com inseticida (Maetro – 2,0 mL p.c. kg<sup>-1</sup> semente) e fungicida (Certeza N – 2,0 mL p.c. kg<sup>-1</sup> semente). Posteriormente, foi semeado 40 kg ha<sup>-1</sup> de sementes, com espaçamento entre linhas de 0,45 m. A cultivar de soja utilizada no estudo foi a BMX Tornado RR 6863 RSF, caracterizada pelo alto potencial produtivo, alto índice de ramificação, bom comportamento em áreas de várzea, grupo de maturação relativa (GMR) de 6.2 e hábito de crescimento indeterminado. O manejo cultural de plantas daninhas, doenças e insetos foram realizados conforme as recomendações técnicas para a cultura da soja. Estes manejos ocorreram desde a semeadura (11/20) até a colheita (04/21), por meio de pulverizações foliares, tendo a precaução de realizar as aplicações em temperaturas inferiores a 28° C e umidade relativa superior a 60 % (Apêndice J).

### 3.3 TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, com seis tratamentos e quatro repetições, totalizando 24 unidades experimentais. Cada parcela, consistiu em uma área de 28 m<sup>2</sup> (7,0 x 4,0 m), sendo estas distanciadas entre si por 2 m (frontal e lateralmente), para evitar interferência entre as parcelas. A parcela útil para avaliações foi composta pelas 4 linhas centrais, desprezando 1 m da bordadura.

O trabalho consistiu nos seguintes tratamentos (Tabela 5): T1 (Testemunha), T2 (Calsite Perfil, 500 kg ha<sup>-1</sup>), T3 (Calsite Perfil 2, 1000 kg ha<sup>-1</sup>) e T4 (Calcário, 3100 kg.ha<sup>-1</sup>), aplicados à lanço e os tratamentos T5 (Calsite Manutenção / mistura com NPK, 100 kg ha<sup>-1</sup>) e T6 (Force S Manutenção / mistura com NPK, 120 kg ha<sup>-1</sup>), aplicados na linha de semeadura. As doses foram recomendadas a partir das informações obtidas das

análises de solo e da avaliação de desempenho dos produtos para este tipo de solo. As garantias mínimas do Calsite são 33 % de Ca e 1 % de Si, enquanto do Force S são 23% de Ca, 1% de Si e 10% de S, onde dos 10 % de S, 4 % estão na forma de  $\text{SO}_4^{2-}$ , que é prontamente absorvida pela planta, enquanto os 6 % restantes estão na forma de enxofre elementar ( $\text{S}^0$ ), liberando  $\text{SO}_4^{2-}$  ao longo do ciclo da cultura.

Tabela 5 – Resumo dos tratamentos realizados

<b>Tratamento</b>	<b>Dose (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Fertilizante - Momento da aplicação</b>
T1	-	-
T2	500	Calsite - Semeadura (Lanço)
T3	1000	Calsite - Semeadura (Lanço)
T4	3100	Calsite - Semeadura (Lanço)
T5	100	Calsite - Semeadura (Linha)
T6	120	Force S - Semeadura (Linha)

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

### 3.4 AVALIAÇÕES

#### 3.4.1 Altura de planta

A altura da planta foi determinada medindo-se a distância, em centímetros, do solo até o último nó pertencente à haste principal. Esta medição foi realizada em dez plantas por parcela, na fase R5.1 (Apêndice J).

#### 3.4.2 Área foliar

A área foliar (AF) foi determinada pelo método da pesagem de discos foliares, de modo que foram coletados 25 discos, em 10 plantas por parcela, com vazador de 10 mm de diâmetro. Os discos amostrados foram secos em estufa de ar forçado, até peso

constante (60° C, em aproximadamente 72 horas), em seguida foram pesados. O cálculo para determinação da área foliar se deu pela seguinte fórmula:

$$AF = \frac{(BSf * Ad)}{BSd}$$

Onde, AF = área foliar; BSf = biomassa seca total das folhas; Ad = soma da área dos discos; BSd = biomassa seca dos discos.

### 3.4.3 Número nós e vagens

No estágio reprodutivo (R5.1) da soja, determinou-se o número de nós na haste principal, a partir do primeiro nó verdadeiro. O número total de vagens foi obtido pelo somatório do número de vagens viáveis e inviáveis nas ramificações. Estes parâmetros foram determinados, por meio da avaliação de 10 plantas por parcela experimental.

### 3.4.4 Peso de mil grãos

A estimativa do peso de mil grãos foi determinada de acordo com a metodologia RAS (2009). Para isto, foram pesadas, em balança de precisão, amostras de oito repetições de cem sementes. O resultado foi estimado para mil grãos. A umidade dos grãos foi corrigida para 13 %, conforme a seguinte fórmula:

$$\frac{(Ui - Uf)}{(100 - Uf)} * 100$$

Onde: Ui = umidade inicial; Uf = umidade final.

### 3.4.5 Produtividade

A determinação do rendimento de grãos (produtividade) foi obtida mediante a colheita manual da parcela, sendo colhidas apenas as linhas centrais, respeitando 1 m de bordadura na frente e atrás da parcela. Os grãos foram trilhados e pesados. A produtividade foi estimada em ha<sup>-1</sup>.

### 3.4.6 Custo de produção

Foi considerado, para o cálculo a utilização de um trator de 134 cv tracionando, um distribuidor de calcário com faixa de trabalho de 11 m de largura (a uma velocidade de 7 km h<sup>-1</sup>, com eficiência operacional de 70 %). Este conjunto, nas condições citadas, terá a capacidade operacional de 0,19 ha h<sup>-1</sup>, com consumo de óleo diesel de 14 L ha<sup>-1</sup> (x R\$ 4,52 L<sup>-1</sup> = R\$ 63,28 h<sup>-1</sup> e R\$ 12,02 ha<sup>-1</sup>).

A manutenção e reparos das máquinas, sem levar em consideração a depreciação, foi estipulada em R\$ 61,11 ha<sup>-1</sup> (x 0,19 ha h<sup>-1</sup> = R\$ 11,61 ha<sup>-1</sup>), para o conjunto distribuidor de calcário e trator de 134 cv.

A mão de obra foi determinada pelo pagamento de um salário de R\$ 2700,00 + encargos sociais para o operador do trator e R\$ 2000,00 para um auxiliar, chegando-se ao valor de R\$ 22,50 e R\$ 16,67 h<sup>-1</sup>, respectivamente. De forma sucinta, os custos por operação foram:

- Custo para aplicação: R\$ 12,02 de diesel + R\$ 4,27 do operador (R\$ 22,50 x 0,19 ha h<sup>-1</sup>) + R\$ 3,16 do auxiliar (R\$ 16,67 x 0,19 ha h<sup>-1</sup>) + R\$ 11,61 de manutenção = R\$ 28,61 ha<sup>-1</sup>
- Custo de manutenção trator + aplicador de calcário: R\$ 61,11/ha x 0,19 ha h<sup>-1</sup> = R\$ 11,61 ha<sup>-1</sup>
- Custo Calsite Perfil (500 kg h<sup>-1</sup>): R\$ 1380,00/ton = R\$ 690,00 ha<sup>-1</sup>
- Custo Calsite Perfil 2 (1000 kg h<sup>-1</sup>): R\$ 1380,00/ton = R\$ 1380,00 ha<sup>-1</sup>
- Custo calcário (3,1 T ha<sup>-1</sup>): R\$ 140,00/ton = R\$ 434 ha<sup>-1</sup>
- Custo Calsite Manutenção (100 kg h<sup>-1</sup>): R\$ 1380,00/ton = R\$ 138,00 ha<sup>-1</sup>
- Custo Force S (120 kg h<sup>-1</sup>): R\$ 1745,00/ton = R\$ 209,4 ha<sup>-1</sup>

Para os custos associado aos tratamentos que visaram a aplicação via linha de plantio (T5 e T6), não se considera um custo adicional visto que todos esses foram utilizados juntamente com a adubação de base NPK.

### 3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados tabulados foram submetidos à ANOVA. Quando o efeito foi significativo ( $P \leq 0,05$ ), os dados foram submetidos à comparação de média pelo teste Scott-Knott. Os dados foram analisados utilizando-se o pacote estatístico Software SASM-Agri.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Das características avaliadas, a altura das plantas variou de 45,85 cm (T5 - Calsite Manutenção) a 50,57 cm (T3 - Calcite Perfil) (Tabela 6). O número de nós na haste principal variou de 13,67 (T6 - Force S) a 15,67 (T4 - calcário) (Tabela 6). E o número de vagens por planta variou de 34,56 (T3 - Calsite Perfil) a 36,58 (T2 - Calsite Perfil) (Tabela 6). Contudo, essas diferenças não foram significativas ( $P > 0,05$ ). Isso provavelmente ocorreu devido a fertilidade inicial do solo na camada superficial (0 a 10 cm), que se caracteriza por pH na faixa adequada (6,14), não possuir  $Al^{3+}$  trocável na solução e apresentar teor de Ca e S acima do nível crítico (4  $cmol\ dm^{-3}$  e 10  $mg\ dm^{-3}$ , respectivamente), além de uma relação de Ca:Mg (3:1) ideal (CANTARELLA *et al.*, 2022).

Tabela 6 – Altura (cm), número de nós na haste principal da soja no estágio R5.1 e número de vagens no estágio R8, em resposta a aplicação dos tratamentos na semeadura

Tratamentos	Altura (cm) <sup>1</sup>	Número de nós <sup>1</sup>	Número de vagens <sup>1</sup>
T1	50,22 a	14,67 a	34,57 a
T2	49,75 a	15,33 a	34,56 a
T3	50,57 a	14,67 a	34,58 a
T4	47,85 a	15,67 a	34,58 a
T5	45,82 a	14,33 a	34,57 a
T6	49,83 a	13,67 a	34,57 a
CV%	7,84	10,2	10,2

<sup>1</sup>Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Scott-Knott ( $P \geq 0,05$ ).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Estudo realizado por Caires *et al.* (2001), não verificou resposta da soja a aplicação de Ca, via calcário e gesso. Os autores atribuíram esta falta de resposta ao crescimento radicular, pela não ocorrência de déficit hídrico, bem como pela ausência de impedimento químico, caracterizado pela saturação de alumínio. Em adição, não foi encontrada resposta da soja, pois os teores de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e S encontravam-se acima do valor mínimo na camada de 0 a 20 e de 20 a 40 cm, mesmo nos tratamentos sem

calcário e sem a aplicação de gesso. Ausência de resposta à Ca e S também foi encontrada em outros trabalhos realizados tanto em plantio direto, como em áreas de plantio convencional (CAIRES *et al.*, 2003; NEIS *et al.* 2010).

A área foliar (AF) foi significativamente ( $P \leq 0,05$ ) afetado pelos tratamentos (Tabela 7). A AF do T4 (Calcário) e do T6 (Force S) foram de 15046,3 cm<sup>2</sup> e 14597,5 cm<sup>2</sup>, respectivamente. Desta forma, o incremento em relação à testemunha foi de 48,5 e 44,1 %, respectivamente. O período de incremento da AF na cultura da soja ocorre, após o início do florescimento (HEIFFIG *et al.*, 2006). Porém, com o avanço do ciclo de desenvolvimento, vai ocorrendo o processo de senescência foliar, que é representado pela queda natural das folhas. Assim, a área foliar é reduzida, devido à menor capacidade das plantas em produzir novas folhas (BENINCASA, 2003).

Tabela 7 – Área foliar da cultura da soja no estádio R5.1, peso de mil grãos e produtividade da soja no estádio R8, em resposta a aplicação dos tratamentos na semeadura

Tratamentos	Área Foliar (cm <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	Peso de Mil Grãos (g) <sup>1</sup>	Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>
T1	10131,05 c	161,43 b	3876 b
T2	12914,49 b	188,06 a	4512 a
T3	13448,74 b	175,97 b	4224 b
T4	15046,32 a	178,88 b	4296 b
T5	13696,38 b	191,09 a	4560 a
T6	14597,52 a	205,84 a	4938 a
CV%	2,93	5,5	5,51

<sup>1</sup>Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Scott-Knott ( $P \geq 0,05$ ).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Além da senescência natural, que ocasiona a redução da AF, fatores estressantes (bióticos e abióticos) também podem contribuir para essas perdas. Na prática agrônômica, redução da AF até 30% e de 15 a 20 %, na fase vegetativa e reprodutiva, respectivamente, são aceitas para o cultivo de soja no Brasil (BOARD *et al.*, 2010; OHNESORG; HUNT, 2015).

O fornecimento de Ca via calagem e o fornecimento de Ca, S e Si via Force S, pode ter retardado a senescência, mantendo, as folhas fotossinteticamente ativas por mais tempo, o que possibilita aumentos nos componentes de rendimento (FERNÁNDEZ

*et al.*, 2009). Portanto, além de servir como importante fonte de reserva para o momento do enchimento do grão, maiores AF garantem que as plantas permaneçam por mais tempo na condição de máxima interceptação da radiação solar (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). Associado a isso, a redução na AF pode ser atribuída à diminuição da taxa fotossintética, e indução de espécies reativas de oxigênio (EROs) (SINGH *et al.*, 2018).

O peso de mil grãos, componente associado ao rendimento, diferiu significativamente entre os tratamentos (Tabela 7), com os maiores valores observados no T6 (Force S), T5 (Calsite Manutenção) e T2 (Calsite Perfil), com 205,84; 191,09 e 188,06 g, respectivamente. O resultado obtido pode ser explicado, em parte, às funções inerente do S na planta (Zhao *et al.*, 2008; Capaldi *et al.*, 2015), haja vista o aumento dos teores de S no solo na camada superficial (0 a 10 cm) (Apêndice B). Esse resultado contradiz os encontrados por Richart *et al.* (2006) e Carvalho *et al.* (2011), que não observaram diferença estatística para esta variável nas lavouras de soja, embora Richart *et al.* (2006) relataram aumento na concentração de S no solo.

Os produtos da TMF fertilizantes possuem, em sua tecnologia, o Ca associado ao Si, que difere na reatividade quando comparado ao silicato de cálcio e calcário. Sendo assim, no caso do silicato de cálcio e calcário, caracterizados por baixa reatividade, os nutrientes não ficam prontamente disponíveis para atender às demandas da planta. Portanto, as fontes de cálcio estudadas, possuem alta reatividade, garantindo que estes elementos estejam disponíveis no sistema, o que proporciona condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas, por consequência, também no enchimento de grãos. Entretanto, Pereira Júnior (2008) não observou influência do Si na produtividade da soja e nas suas características agrônomicas.

Apesar do Ca e do S serem considerados imóveis, quanto a redistribuição no floema, a disponibilidade de ambos interfere no peso de grãos. O fornecimento constante de Ca para as plantas possibilita a manutenção das flores e vagens, pois este reduz o abortamento. Além disso, o S, ao ser incorporado no grão, favorece o incremento da sua massa (SILVA *et al.*, 2003; GALERIANE *et al.*, 2022). Portanto, a massa de grãos pode ser utilizada para estimar a eficiência do processo de enchimento

de grãos, além de expressar de forma indireta o bom estado fisiológico da planta (CAIRES *et al.*, 2006; MARQUES *et al.*, 2011).

A produtividade da soja foi significativamente afetada pelos tratamentos (Tabela 7). As maiores médias foram obtidas nos tratamentos T6 (Force S), T5 (Calsite Manutenção), e T2 (Calsite Perfil), com 4938, 4560 e 4512 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Desta maneira, a produtividade refletiu o efeito observado no componente de produção peso de mil grãos (Tabela 7). Bruin e Pederson (2009) relataram que o aumento de determinados componentes, tais como peso de grão e índice de colheita foram significativa e positivamente relacionados com a produtividade da soja. Aumento na produtividade é o principal resultado esperado, em decorrência da aplicação dos tratamentos, bem como é o fator que justifica a adoção de determinada tecnologia. A TMF fertilizantes, têm como preocupação realizar trabalhos a campo para garantir a efetividade da sua tecnologia. Assim, a utilização do Ca associado ao Si, permite efetividade a nível solo e planta, revertendo a resposta em incremento de produtividade (Apêndice L). A TMF fertilizantes realiza nas distintas regiões do Brasil diversos trabalhos “lado a lado” e científicos com instituições renomadas à fim de entregar resultados, por exemplo, no ano de 2022 realizou-se diversos trabalhos em uma gama de cultura, inclusive na soja (Apêndice L). A regional sul desenvolveu dois trabalhos em “área lado a lado” e quatro em instituições de pesquisas, obtendo-se incremento médio de 3,7 e 3,3 sc ha<sup>-1</sup> respectivamente, quando comparado ao manejo do produtor. No ano de 2021, na mesma região foram realizados 16 trabalhos, e a utilização da tecnologia resultou no incremento médio de 8,9 sc ha<sup>-1</sup> de soja. Portanto, os efeitos positivos nos componentes relacionados ao desenvolvimento e rendimento tornam os manejos da fertilidade do solo viáveis para melhorar a capacidade produtiva da soja.

A tecnologia do Ca associado ao Si permite que estes nutrientes sejam mais solúveis no sistema, tornando estes mais facilmente absorvidos pelas raízes das plantas. Nesse trabalho, os tratamentos que refletiram em maiores produtividades, empregaram a tecnologia do Ca associado ao Si, o que garante uma reação mais rápida e, uma liberação inicialmente maior dos nutrientes, diferente do calcário, que por ser uma rocha mais dura na escala de Mohs, bem como por não sofrer processos físicos e químicos, não solubiliza rapidamente os nutrientes, sendo eles liberados ao

longo do tempo. Assim, o Ca disponível no solo pode ter sido inferior ao requerido pela planta, refletindo em menores patamares produtivos (RATKE *et al.* 2018), como é o caso do T4.

Outra questão importante é referente aos níveis de Ca em profundidade. A prática de manejo atualmente empregada visa à aplicação de corretivo de acidez e condicionador de solo, como o calcário e o gesso, em superfície, no sistema de plantio direto, onde não há revolvimento do solo e incorporação dos insumos. O objetivo é melhorar a qualidade química do solo ao longo do perfil, por meio do fornecimento de Ca. A disponibilidade de Ca em profundidade, juntamente com o boro (B), é fundamental para que a planta desenvolva raízes em profundidade, visando tolerar condições adversas, mantendo o potencial produtivo (PAULETTI *et al.*, 2014; DALLA NORA *et al.*, 2017; PIAS *et al.*, 2020). Visando construção do perfil químico do solo, o Calsite é uma fonte importante, mesmo em sistema de plantio direto consolidado, pois ele possui a tecnologia do Ca móvel. Além disso, tem alto potencial de fornecimento de Si, elemento benéfico, que atua na tolerância a estresses biótico e abiótico (DEBONA *et al.*, 2017).

O Ca é primordial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, atuando na formação e estruturação da parede celular (pectato de cálcio), na divisão celular, crescimento radicular, germinação do tubo polínico, sinalização celular e na defesa à estresses bióticos e abióticos (WHITE; BROADLEY, 2003; THOR, 2019). A absorção deste nutriente ocorre na região não suberizada da raiz, a coifa. Além disso, devido à baixa mobilidade do Ca no floema, a redistribuição deste elemento do órgão fonte (folha velha) para o dreno (folha nova, fruto e raiz), não ocorre de forma apreciável, portanto, a manutenção dos níveis deste elemento ao longo do perfil do solo é essencial.

O solo da área experimental caracteriza-se por apresentar textura média, com teor adequado de S e baixa quantidade de matéria orgânica (1,5%) na camada 0 a 10 e 10 a 20 cm (Tabela 3). Apesar do teor de S no solo estar acima no nível crítico (10 mg dm<sup>-3</sup>), os baixos teores de matéria orgânica e a textura do solo, possibilitaram uma resposta da soja frente à adição deste elemento, juntamente com o Ca. No geral, baixas respostas ao S são encontradas quando seu teor no solo está acima de 7,6 mg dm<sup>-3</sup> e em solos com baixo teor de matéria orgânica, sendo ela o principal depósito de S

no solo. Também é importante destacar os baixos teores de argila, pois solos com elevados teores de argila, como os Latossolos, possuem maior capacidade de adsorver  $S-SO_4^{2-}$  presente na solução do solo, evitando que o mesmo seja lixiviado (FONTOURA *et al.*, 2019). Portanto, a probabilidade de resposta à aplicação de S é maior em solos intemperizados. Diversas culturas cultivadas em solos com teores baixos de matéria orgânica e argila, em solos do Rio Grande do Sul (RS), indicam possibilidade de resposta à aplicação de S (ALVAREZ, 2004).

O fornecimento de S favorece o aumento de produtividade da soja (ZHAO *et al.*, 2008), haja vista que ele, em níveis adequados, é essencial para o desenvolvimento e produtividade da cultura (BROCH *et al.*, 2011; CHANDRA; PANDEY, 2016). Este aumento de produtividade está relacionado às funções inerentes do S, seja no efeito catalítico, regulatório ou estrutural. De forma sucinta, o S exerce papel primordial na formação de proteínas, ocasionando maior pegamento e formação dos grãos, com consequente aumento na produtividade (BALEN *et al.*, 2015). Além disso, o S interfere na eficiência fotossintética, haja vista seu papel na atividade da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase (RuBisCo) (LUNDE *et al.*, 2008) que, impacta a produtividade. Sendo assim, a disponibilidade de Ca e S em toda fase de desenvolvimento da cultura, tendo em vista a reatividade dos produtos Calsite e Force S, proporcionaram um ambiente favorável às plantas, revertendo isso em produtividade.

Dos fatores que implicam na tomada de decisão dos produtores pela aplicação dos fertilizantes e corretivos, o custo é decisivo. Desta forma, é importante analisar os custos de produção associados à aplicação dos produtos (Tabela 8), bem como o incremento de produtividade e o lucro líquido (Tabela 9). A utilização do Force S (T6), Calsite Manutenção (T5) e Calsite Perfil (T2) promoveram maior eficiência na utilização dos nutrientes pelas plantas, gerando economia para o produtor, evidenciado pelos maiores lucros líquidos. Já o uso do calcário (T4) e Calsite Perfil (T3) proporcionaram os menores lucros líquidos (Tabela 9). Assim, a aplicação do T6, T5 e T2 aumentaram o lucro líquido em relação ao calcário em 18, 10 e 3 %, respectivamente. Esses resultados econômicos demonstram a importância em disponibilizar prontamente o Ca para a soja. A reatividade do calcário, e consequentemente sua disponibilidade é dependente da umidade (precipitação). Desta forma, em condições de baixa

precipitação o requerimento de Ca pela cultura da soja, que se caracteriza por ciclo curto pode não ofertada. Por isso, a aplicação do Force S (T6), Calsite Manutenção (T5) e Calsite Perfil (T2) apresentaram resultados positivos, proporcionando condições favoráveis à cultura, permitindo aumento de produtividade da soja, com consequência em maiores lucros ao produtor.

Tabela 8 – Custo operacional dos diferentes tratamentos, considerando os valores de comercialização de janeiro de 2023

Tratamento	Custo do produto	Custo de aplicação	Manutenção de máquinas	Total
			R\$ ha <sup>-1</sup>	
T1	-	-	-	-
T2	690,00	28,61	11,61	730,22
T3	1.380,00	28,61	11,61	1.420,22
T4	434,00	28,61	11,61	474,22
T5	138,00	28,61	11,61	178,22
T6	209,40	28,61	11,61	249,62

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Tabela 9 – Custo-benefício dos tratamentos aplicados

Tratamento	Custo	Produtividade da soja	Receita soja <sup>1</sup>	Lucro líquido	Diferença em relação à testemunha
	R\$ ha <sup>-1</sup>	sc ha <sup>-1</sup>	R\$ ha <sup>-1</sup>	R\$ ha <sup>-1</sup>	R\$ ha <sup>-1</sup>
T1	-	64,6	9.690,0	-	-
T2	730,2	75,2	11.280,0	10.549,8	859,8
T3	1420,2	70,4	10.560,0	9.139,8	-550,2
T4	474,2	71,6	10.740,0	10.265,8	575,8
T5	178,2	76,4	11.460,0	11.281,8	1591,8
T6	249,6	82,3	12.345,0	12.095,4	2405,4

<sup>1</sup>Considerando o valor de comercialização do saco de soja em R\$ 150,00.

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produtividade da soja no Brasil tem crescido nos últimos anos, em parte devido ao potencial produtivo das cultivares, bem como a melhoria do ambiente produtivo, onde se destaca o manejo do solo, no âmbito físico, químico e biológico. Sendo demasiadamente importante os níveis críticos e o equilíbrio dos nutrientes no solo, não somente N, P, K, mas também Ca, Mg, S, além dos micronutrientes, visando aumento de patamar produtivo. Nessa vertente, os parâmetros analisados (índice de área foliar, peso de mil grãos e produtividade da soja) apresentaram resposta significativa, sendo observado que o T6 (Force S) destacou-se frente aos demais tratamentos. Possivelmente, essa resposta está associada a maior disponibilidade do Ca para a demanda da cultura, bem como a oferta de S, altamente requerido pelas leguminosas. Portanto, com base nos resultados, a cultura respondeu positivamente à aplicação desses nutrientes. Outra questão importante é que os fertilizantes e corretivos têm uma participação significativa nos custos de produção, com grande impacto na rentabilidade da cultura. Desta maneira, o T6 apresentou melhor relação custo-benefício para o produtor.

Apesar de não haver diferenças quanto aos parâmetros de solo, por se tratar de um solo com fertilidade construída, as variáveis de rendimentos (peso de mil grãos e produtividade) diferiram entre os tratamentos. Sendo o T6 (Force S), T5 (Calsite Manutenção) e T2 (Calsite Perfil), os tratamentos que obtiveram maiores médias para estas variáveis.

A aplicação da tecnologia do Ca garantiu retorno econômico, assim, os tratamentos T6 (Force S), T5 (Calsite Manutenção) e T2 (Calsite Perfil) proporcionaram lucro líquido de 18, 10 e 3 %, respectivamente, quando comparado ao calcário.

Portanto o emprego do Ca, Si e S no sistema solo, proporcionam ambiente propício ao desenvolvimento das plantas, revertendo as respostas em produtividade.

## REFERÊNCIAS

- AARABI, F. *et al.* Coordinating sulfur pools under sulfate deprivation. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 25, p. 1227–1239, 2020.
- ALVAREZ, J. W. R. **Disponibilidade e resposta de culturas ao enxofre em solos do Rio Grande do Sul**. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2004.
- ALVAREZ, V. H.; RIBEIRO, A. C. 1999. Calagem. *In*: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: SBCS, 1999. p. 43-61.
- AULER, A. C. *et al.* Lime effects in a no-tillage system on inceptisols in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 15, e00206, p. 1-11, 2019.
- BAKHAT, H. F. *et al.* Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: A review, **Crop Protection**, Greensboro, v. 104, p. 21-34, 2018.
- BALEN, A. B. *et al.* Aplicação de fertilizante foliar na cultura da soja. *In*: **XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 2015, Natal - RN. O Solo e Suas Múltiplas Funções, 2015.
- BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas**: Noções básicas. 2. ed. Jaboticabal: Funep, 2003, 41 p.
- BENITES, V. M. *et al.* **Potássio, Cálcio e Magnésio**. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes. 2. ed. Piracicaba: IPNI, 2010. 362 p.
- BILLARD, V. *et al.* Mg deficiency affects leaf Mg remobilization and the proteome in *Brassica napus*. **Plant Physiology and Biochemistry**, Los Angeles, v. 107, p. 337-343, 2016.
- BLAKE-KALFF, M. M.A *et al.* Diagnosing sulfur deficiency in field-grown oilseed rape (*Brassica napus* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 225, n. 1, p. 95-107, 2000.
- BLOSS, F. D. **Crystallography and crystal chemistry**: An Introduction. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1971. 554 p.
- BOARD, J. E. *et al.* Yield response of soybean to partial and total defoliation during the seed-filling period. **Crop Science**. v. 50, n. 2, p. 703-712, 2010.

BORTOLUZZI, E. C. *et al.* Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 262-271, 2014.

BOSSOLANI, J. W. *et al.* 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**, Temuco, v. 20, p. 1-12, 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. 1. ed. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 395 p.

BROCH, D. L. *et al.* Soybean grain yield in cerrado region influenced by sulphur sources. **Revista Ciência Agronômica**, Ceará, v. 42, n. 3, p. 791-796.

CAIRES, E. F. *et al.* Crescimento radicular e nutrição da soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 1029-1040, 2001.

CAIRES, E. F. *et al.* Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p.275-286, 2003.

CAIRES, E. F. *et al.* Soybean yield and quality as a function of lime and gypsum applications. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 4, p. 370-379, 2006.

CAIRES, E. F. *et al.* Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 66, p. 41-53, 2015.

CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W. **Uso de corretivos granulados na agricultura**. Piracicaba: IPNI International Plant Nutrition Institute, n. 154, p. 17-21, 2016.

CAKMAK, I.; KIRKBY, E. A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. **Physiologia Plantarum**, Sweden, v. 133, n. 4, p. 692-704, 2008.

CAKMAK, I.; YAZICI, A. Magnesium: a forgotten element in crop production. **Better Crop**, v. 94, n. 2, p. 23-25, 2010.

CAKMAK, I. Magnesium in crop production, food quality and human health. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 368, n.1, p.1-4, 2013.

CAMPANHARO, M. *et al.* Avaliação de métodos de necessidade de calagem no Brasil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 1, p. 97-105, 2007.

- CANTARELLA, H. *et al.* **Boletim 100**: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2 ed. Campinas: Instituto agrônomo de Campinas (IAC), 2022. 500 p.
- CAPALDI, F. R. *et al.* Sulfur metabolism and stress defense responses in plants. **Tropical Plant Biology**, New York, v. 8, n. 3-4, p. 60-73, 2015.
- CARVALHO, E. R. *et al.* Fertilizante mineral e resíduo orgânico sobre características agrônômicas da soja e nutrientes no solo. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 42, n. 4, p. 930-939, 2011.
- CASTRO, G. S. A. *et al.* Surface application of limestone and calcium-magnesium silicate in a tropical no-tillage system. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Santiago, v. 16, n. 3, p. 1-15. 2016.
- CEYLAN, Y. *et al.* Magnesium applications to growth medium and foliage affect the starch distribution, increase the grain size and improve the seed germination in wheat. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 406, n. 1-2, p. 145-156, 2016.
- CHAN, K. X. *et al.* Secondary sulfur metabolism in cellular signalling and oxidative stress responses. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 70, n. 16, p. 4237-4250, 2019.
- CHANDRA, N.; PANDEY, Nalini. Role of sulfur nutrition in plant and seed metabolism of *Glycine max* L. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 39, n. 8, p. 1103 -1111, 2016.
- CHEN, C.-T. *et al.* Effects of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, or magnesium deficiency on growth and photosynthesis of *Eustoma*. **HortScience**, California, v. 53, n. 6, p. 795-798, 2018.
- CIOTTA, M. N. *et al.* Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolo Bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 317-26, 2004.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. SBCS-NRS: Brasil, 10 ed., Porto Alegre, 2016, 376p.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim de Safras 12º** - levantamento. Brasília: Conab, 2022. E-book (88 p.).
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Soja análise mensal** – Junho 2021. Brasília: Conab, 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuário-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-soja/item/15934-soja-analise-mensal-junho-2021>. Acesso em: 20 set. 2022.

- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Brasília, DF, v. 9, safra 2021/22. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 14 jun. 2022.
- CONNOR, D. J.; LOOMIS, R. S.; CASSMAN, K. G. **Crop ecology**: productivity and management in agricultural systems. 2. ed. Cambridge University Press: Cambridge, 2011.
- COSTA, C. H. M. *et al.* Intensive annual crop production and root development in a tropical acid soil under long-term no-till and soil-amendment management. **Crop and Pasture Science**, Clayton South, v. 69, n. 5, p. 488-505. 2018.
- CUNNINGHAM, C. Characterization of dry spells in Southeastern Brazil during the monsoon season. **International Journal of Climatology**, London, v. 40, n. 10, p. 4609-4621, 2020.
- DALLA NORA, D. *et al.* Modern high-yielding maize, wheat and soybean cultivars in response to gypsum and lime application on no-till oxisol. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 41, p. 1-21, 2017.
- FREITAS, S. T. de; MITCHAM, E. Factors involved in fruit calcium deficiency disorders. **Horticultural Reviews**, New York, v. 40, n. 1, p. 107-146, 2012.
- BRUIN, J. L. de; PEDERSEN, P. New and old soybean cultivar responses to plant density and intercepted light. **Crop Science**, v. 49, n. 6, p. 2225–2232, 2009.
- DEBONA, D. *et al.* Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. **Annual Review of Phytopathology**, New York, v. 4, n. 55, p. 85-107, 2017.
- DEFANTE, L. R.; VILPOUX, O. F.; SAUER, L. Rapid expansion of sugarcane crop for biofuels and influence on food production in the first producing region of Brazil. **Food Policy**, London, v. 79, p. 121-131, 2018.
- DEMATTÊ, J. L. I. **Ação do gesso e do calcário na relação cálcio**: magnésio do solo e na produtividade de cana de açúcar. Informações Agronômicas: IPNI, 2011. 16 p.
- DOMINGOS, C. da Silva; LIMA, L. H. da S.; BRACCINI, A. L. Nutrição mineral e ferramentas para o manejo da adubação na cultura da soja. **Scientia Agrária Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 14, n. 3, p. 132-140, 2015.
- DONG, S. *et al.* A study on soybean responses to drought stress and rehydration. **Saudi Journal of Biological Sciences**. Arábia Saudita, v. 26, p. 1-12, 2019.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2013. 353 p.

ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. Lages: UDESC, 2008. 230 p.

ESCOSTEGUY, P. A. V.; BISSANI, C. A. Estimativa de H + Al pelo pH SMP em solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 175-179, 1999.

ETIENNE, P. *et al.* Assessment of sulfur deficiency under field conditions by single measurements of sulfur, chloride and phosphorus in mature leaves. **Plants**, v. 7, n. 2, p. 1-16, 2018.

FAGERIA, N. K. Resposta de arroz de terras altas, feijão, milho e soja à saturação por base em solo de Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 416-424, 2001.

FAGERIA, N. K.; NASCENTE, A. Management of soil acidity of South American soils for sustainable crop production. *In*: SPARKS, D. L. (ed). **Advances in Agronomy**. Amsterdam, v. 128, p. 221-275, 2014.

FIORINI, I. V. A. *et al.* Dry matter accumulation, chlorophyll and sulfur leaf in corn fertilized with different sulfur sources. **Journal of bioenergy and food science**, Macapá, v. 4, n. 1, p. 1-11, 2017.

FONTOURA, S. M. V. *et al.* Effect of gypsum rates and lime with different reactivity on soil acidity and crop grain yields in a subtropical Oxisol under no-tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 193, n. 26, p. 27-41, 2019. doi:10.1016/j.still.2019.05.005.

FUENTES-LARA, L. O. *et al.* From elemental sulfur to hydrogen sulfide in agricultural soils and plants. **Molecules**, Basel, v. 24, n. 12, p. 1-17, 2019.

FULLIN, E. A. Acidez do solo e calagem. *In*: DADALTO, G. G.; FULLIN, E. A. **Manual de Necessidade de Calagem e Adubação para o Estado do Espírito Santo**. Vitória, ES: SEEA/ INCAPER, 2001. p. 70-98.

GAZZONI, D. L.; DALL' AGNOL, A. **A saga da soja**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 202 p.

GILLIHAM, M. *et al.* Calcium delivery and storage in plant leaves: Exploring the link with water flow. **Journal Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 7, p. 2233-2250, 2011.

- GOUT, E. *et al.* Interplay of Mg<sup>2+</sup>, ADP, and ATP in the cytosol and mitochondria: unravelling the role of Mg<sup>2+</sup> in cell respiration. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA**, Washington, DC v. 111, n. 43, p. 4560-4567, 2014.
- GRANSEE, A; FÜHRS, H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 368, n. 1-2, p. 5-21, 2013.
- HEIFFIG, L. S. *et al.* Closed canopy and leaf area index of soybean in different space arrangements. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 2, p. 285-295, 2006.
- HENRIET, C. *et al.* Water stress combined with sulfur deficiency in pea affects yield components but mitigates the effect of deficiency on seed globulin composition. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 70, n. 16, p. 4287-4303, 2019.
- HO, L. C.; WHITE, P. J. A cellular hypothesis for the induction of blossom-end rot in tomato fruit. **Annals of Botany**, London, v. 95, n. 4, p. 571-581, 2005.
- HOCKING, B. *et al.* Fruit calcium: Transport and physiology. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 7, n. 569, p. 1-17, 2016.
- HOLZSCHUUC, M. J. **Eficiência de calcário calcítico e dolomítico na correção da acidez de solos na acidez de solos sob plantio direto**. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.
- HOUHOU, M. *et al.* Biomass production, chlorophyll content and morphological parameters are affected by sulfur deficiency in *Eruca sativa* L. **Journal of Ecology and Environmental Science**, Dubai, v. 44, p. 67-75. 2018.
- KAMINSKI, J. *et al.* Estimativa da acidez potencial em solos e sua implicação no cálculo da necessidade de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n. 4, p.1107-1113, 2002.
- KOPRIVA, S. Regulation of sulfate assimilation in *Arabidopsis* and beyond. **Annals of Botany**, London, v. 97, n. 4, p.479-495, 2006.
- KUNERT, K.; VORSTER, J. B. In search for drought-tolerant soybean: is the slow-wilting phenotype more than just a curiosity? **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 71, n. 2, p. 457-460, 2020.
- KUNHIKRISHNAN, A. *et al.* Functional relationships of soil acidification, liming, and greenhouse gas flux. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 139, p. 1-71, 2016.
- LI, Q. *et al.* Sulfur homeostasis in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, Berna, v. 21, n. 23, p. 1-16, 2020.

- LI, Y. *et al.* Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species: a global meta-analysis. **Journal of Soils and Sediments**, Berlim, v. 19, n. 4, p. 1393-1406, 2019.
- LÓPEZ-LÓPEZ, A. *et al.* Rhizobial symbioses in tropical legumes and non-legumes. *In*: DION, P. **Soil biology and agriculture in the tropics**. Soil Biology. Germany: Springer, 2010. p. 163-184.
- LUNDE, C. *et al.* Sulfur starvation in rice: The effect on photosynthesis, carbohydrate metabolism, and oxidative stress protective pathways. **Physiology Plantarum**, Sweden, v. 134, n. 3, p. 508-521, 2008.
- MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Sciences**, London, v. 11, n. 8, p. 392-397, 2006.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafós Publishing, 1997.
- MARQUES, M. C. Adaptability and stability of soybean genotypes under different times of sowing. **Bioscience Journal**. Uberlândia, v. 27, n. 1, p. 59-69, 2011.
- MARUYAMA-NAKASHITA, A. Metabolic changes sustain the plant life in low-sulfur environments. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 39, p. 144-151, 2017.
- McLEAN, E.O.; DUMFORD, S.W.; CORONEL, F.A. comparison of several methods of determining lime requirements of soils. **Soil Science Society of America, Proceedings**, v. 30, p. 26-30, 1966.
- McAINSH, M. R.; PITTMAN, J. K. Shaping the calcium signature. **New Phytologist**, London v. 181, n. 2, p. 275-294, 2009.
- MEDA, A. R. *et al.* Plantas invasoras para a melhorar a eficiência da calagem na correção da acidez subsuperficial do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 647-654, 2002.
- MENG, C. *et al.* Global soil acidification impacts on belowground processes. **Environmental Research Letters**, London, v. 14, n. 074003, p. 1-10, 2019.
- MENGUTAY, M. *et al.* Adequate magnesium nutrition mitigates adverse effects of heat stress on maize and wheat. **Plant and Soil**. Amsterdam v. 368, n. 1-2, p. 57-72, 2013.
- MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. **Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Departamento de plantas de lavouras da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Evangraf, 2005.

- NATALE, W. *et al.* Efeitos da calagem na fertilidade do solo e na nutrição e produtividade da goiabeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1475-1485, 2007.
- NAKAI, Y.; MARUYAMA-NAKASHITA, A. Biosynthesis of sulfur-containing small biomolecules in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, Berna v. 21, n. 10, p. 1-13, 2020.
- NEIS, L. *et al.* Gesso agrícola e rendimento de grãos de soja na região do sudoeste de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n.2, p. 409-416, 2010.
- NUERNBERG, N. J.; RECH, T. D.; BASSO, C. **Usos do gesso agrícola**. Florianópolis: Epagri, Boletim Técnico, 2002, 31 p.
- OHNESORG, W. J.; HUNT, T. E. **Managing soybean defoliators**. Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska–Lincoln, Lincoln, 2015.
- OHYAMA, T. *et al.* Soybean – recent advances in research and applications. *In*: ISLAM, Mohammad Sohikul *et al.* **Soybean and sustainable agriculture for food security**. London: IntechOpen, 2022.
- OLIVEIRA, F. M. da C. *et al.* Características mineralógicas e cristalográficas da gipsita do Araripe. **Holos**, Mossoró, v. 5, p. 71-82, 2012.
- OSMAN, K. T. Acid soils and acid sulfate soils. *In*: OSMAN, Khan Towhid. **Management of Soil Problems**, New York: Springer, 2018, p. 299-332.
- PALMER, R. V. Sulphur supply and the optimization of the yield of wheat. **14<sup>th</sup> International Plant Nutrition Colloquium**. Hannover: Klett Treffpunkt Hannover, p. 836-837, 2001.
- PAULETTI, V. *et al.* Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 495-505, 2014.
- PEIXOTO, P. H. P.; PIMENTA, D. S.; CAMBRAIA, J. Alterações morfológicas e acúmulo de compostos fenólicos em plantas de sorgo sob estresse de alumínio. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n.1, p. 17-25, 2007.
- PEREIRA JÚNIOR, P. **Doses de silício na produtividade de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] e suas características agrônômicas**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 37 p. 2008.
- PIAS, O. H. de C. *et al.* Does gypsum increase crop grain yield on no-tilled acid soils? A meta-analysis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 112, n. 2, 2020

- QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. V.; MALAVOLTA, E. **Alternative use of SMP buffer solution to determine lime requirement of soils**. Communications Soil Science Plant Analysis, New York, v. 16, n. 3, p. 245-260, 1985.
- QUAGGIO, J. A. **Crêterios para calagem em solos no estado de São Paulo**. 1983. Disserta o (Mestrado em Solos e Nutri o de Plantas) – Programa de Pós-gradua o em Solos e Nutri o de Plantas, ESALQ/USP, Piracicaba, SP, 1983.
- QUAGGIO, J. A. *et al.* Respostas da soja   aplica o de calcário e gesso e lixivia o de íons no perfil do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, n. 3, p. 375-383, 1993.
- QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2000.
- RAIJ, B. van *et al.* **Recomenda es de calagem e aduba o para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC & Funda o IAC, 1997. 285 p.
- RAIJ, B. van. **Gesso na agricultura**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 233 p.
- RAIJ, B. van. **Melhorando o ambiente radicular em subsuperfície**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, p 8-18, 2011.
- RAMPIM, L. *et al.* Atributos químicos de solo e resposta do trigo e da soja ao gesso em sistema semeadura direta. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p. 1687-1698, 2011.
- RATKE, R. F. *et al.* Different limestone particle sizes for soil acidity correction, Ca and Mg supply and corn yield. **Comunicata Scientiae**, Piau , v. 9, n. 2, p. 175-184, 2018.
- RESURRECCION, Adoracion P., *et al.* Effects of sulfur nutrition on the growth and photosynthesis of rice. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 47, p. 611-620, 2001.
- RHEINHEIMER, D. S. Altera es de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p.797-805, 2000.
- RHEINHEIMER, D. S. *et al.* 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**, Amsterdam, v. 313, p. 7-16, 2018.
- RICHART, A. *et al.* Disponibilidade de fósforo e enxofre para a cultura da soja na presença de fosfato natural reativo, superfosfato triplo e enxofre elementar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 695-705, 2006.

SAURE, M. C. Calcium translocation to fleshy fruit: Its mechanism and endogenous control. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 65-89, 2005.

SCHERER, H. W. Sulphur in crop production - Invited paper. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 14, n. 2, p. 81-111, 2001.

SEEFELDT, L. C. *et al.* Mechanism of Mo-dependent nitrogenase. **Annual Review of Biochemistry**, Palo Alto, v. 78, p. 701-22, 2009.

SFREDO, G. J.; LANTMANN, À. F. Enxofre: nutriente necessário para maiores rendimentos da soja. **Embrapa Circular técnica**, n. 53. Londrina, PR, 2007. 6 p. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/470730/1/2007CircularTecnica.n.53.Enxofre21x28OK.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2023.

SHOEMAKER, H. E.; MCLEAN, E. O.; PRATT, P. F. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amounts of extractable aluminium. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 25, p. 274-277, 1961.

SILVA, D. *et al.* Translocation and redistribution of sulphur in corn and soybean plants. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n.6, p. 715-721, 2003.

SILVA, R. R.; SARTORI, M. da G. B.; WOLLMANN, C. A. Relação entre precipitação pluviométrica e produtividade da cultura de soja, no município de Ibirubá - RS. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, São Paulo, v. 27, p. 296-314, 2014.

SINGH, R. Simultaneous exposure of sulphur and calcium hinder As toxicity: up-regulation of growth, mineral nutrients uptake and antioxidants system. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, New York, v. 161, p. 318-331, 2018.

SMITH, K. A.; GOINS, L. E.; LOGAN, T. J. Effect of calcium oxide dose on thermal reactions, lime speciation, and physical properties of alkaline stabilized biosolids. **Water Environment Research**, Honshu, v. 70, n. 2, p. 224-230, 1998.

SOBRAL, L. F. *et al.* **Liberção de K pelo flogopitito em um Argissolo cultivado com coqueiro anão verde irrigado**. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2009, Fortaleza. Anais do Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2009.

SOTI, P. S. *et al.* Effect of soil pH on growth, nutrient uptake, and mycorrhizal colonization in exotic invasive *Lygodium microphyllum*. **Plant Ecology**, v. 216, p. 989-998, 2015.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Nutrição e produtividade de grãos da aveia preta em função da aplicação de calcário e gesso em superfície na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 715-725, 2008.

St. JOHN, R. A. *et al.* Secondary nutrients and micronutrient fertilization. *In*: STIER, J. C. *et al.* **Turfgrass**: biology, use, and management. ASA, CSSA, and SSSA: Madison, USA. 2013. p. 521-541.

SUMNER, M.; NOBLE, A. D. Soil acidification: the world story. *In*: RENGEL, Z. **Handb of soil acidity**. Marcel Dekker, New York, 2003. p. 1-28.

TAKAHASHI, H. *et al.* Sulfur assimilation in photosynthetic organisms: molecular functions and regulations of transporters and assimilatory enzymes. **Annual Review of Plant Biology**, v. 62, n. 1p. 157-184, 2011.

TAKAHASHI, H. Sulfate transport systems in plants: Functional diversity and molecular mechanisms underlying regulatory coordination. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 70, p. 4075-4087, 2019.

TAMÁS, L. *et al.* Aluminium-induced drought and oxidative stress in barley roots. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 163, n. 7, p. 781–784, 2006.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p.

TELMAN, W.; DIETZ, K.-J. Thiol redox-regulation for efficient adjustment of sulfur metabolism in acclimation to abiotic stress. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 70, n. 16, p. 4223-4236, 2019.

THOMPSON, J. F. *et al.* Sulfur metabolism in plants. *In*: TABATABAI, M. A. (ed.). **Sulfur in Agriculture**. Agronomy Society of America, Madison, USA, 1986.

THOR, K. Calcium-Nutrient and Messenger. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 25, n. 10, p. 1-10, 2019.

VERBRUGGEN, N.; HERMANS, C. Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 368, n. 1-2, p. 87-99, 2013.

VITTI, G. C. *et al.* **Uso do gesso em sistemas de produção agrícola**. 1. ed. Piracicaba: GAPE, 2008. 104 p.

VITTI, G. C.; OTTO, R.; SAVIETO, J. **Manejo do enxofre na agricultura**. IPNI, Informações Agronômicas, n. 152, 2015. Disponível em: [http://www.ipni.net/PUBLICATION/IA-BRASIL.NSF/0/871A1FBA4FE913DC83257F31004B6371/\\$FILE/Page1-14-152.pdf](http://www.ipni.net/PUBLICATION/IA-BRASIL.NSF/0/871A1FBA4FE913DC83257F31004B6371/$FILE/Page1-14-152.pdf). Acesso em: 14 jun. 2022.

- WHITE, P. J. The pathways of calcium movement to the xylem. **Journal Experimental Botany**, Oxford, v. 52, n. 358, p. 891-899, 2001.
- WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Calcium in plant. **Annals of Botany**, London, v. 92, n. 4, p. 487-511, 2003.
- WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. **New Phytologist**, London, v. 182, n. 1, p. 49-84, 2008.
- YANG, G. H. *et al.* Physiological impacts of magnesium-deficiency in citrus seedlings: photosynthesis, antioxidant system and carbohydrates. **Trees**, Berlin, v. 26, p. 1237-1250, 2012.
- YANG, Z.-B.; RAO, I. M.; HORST, W. J. Interaction of aluminium and drought stress on root growth and crop yield on acid soils. **HPlant and Soil**, Dordrecht, v. 372, n.1, p. 3-25, 2013.
- YU, Z. *et al.* Impact of mid-season sulphur deficiency on wheat nitrogen metabolism and biosynthesis of grain protein. **Scientif Reports**, London, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2018.
- ZAMBOLIM, L.; VENTURA, J. A.; JUNIOR, L. A. Z. **Efeito da nutrição mineral no controle de doenças de plantas**. 1. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Fitopatologia, 327 p. 2012.
- ZHAO, Y. *et al.* Effects of sulfur fertilization on soybean root and leaf traits, and soil microbial activity. **Journal of Plant Nutrition**, United State, v. 31, n. 3, p. 473-448, 2008.

**APÊNDICE A – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 0 - 10 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO**

Tratamento	pH água	Ca	Mg	CTC efetiva	Al	H+Al	Saturação (%)		Índice SMP
		cmol dm <sup>-3</sup>			cmolc dm <sup>-3</sup>		Al	Bases	
T1	6,5	7,7	3	10,9	0,0	1,4	0,0	88,4	7,0
T2	5,6	6,8	2,2,0	9,2	0,0	3,1	0,0	74,6	6,3
T3	5,8	7,6	2,7	10,5	0,0	1,7	0,0	86,2	6,8
T4	6,3	7,7	3,0	10,9	0,0	1,4	0,0	88,5	7,0
T5	6,3	9,0	3,5	12,8	0,0	2,2	0,0	85,1	6,6
T6	6,0	7,6	2,8	10,7	0,0	1,7	0,0	86,5	6,8

“pH em água 1:1; Ca, Mg e Al trocáveis com KCl 1M e CTC a pH 7,0” (Bibliografia: Boletim Técnico 05 Tedesco *et al.*, 1995). Índice SMP (Bibliografia: Solução Tampão TSM: Toledo, J. 2011).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

**APÊNDICE B – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 0 - 10 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO**

Tratamento	MO	S	P-Mehlich	K	CTC pH7	K
	%	mg dm <sup>-3</sup>		cmol dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	
T1	1,3	14,9	7,6	0,2	12,3	80,0
T2	1,1	14,8	7,4	0,2	12,3	72,0
T3	1,3	15,3	14,6	0,2	12,2	88,0
T4	1,3	20,2	9,9	0,2	12,3	88,0
T5	1,4	15,3	9,8	0,2	15,0	84,0
T6	1,2	13,5	16,6	0,3	12,4	104,0

“MO determinada pelo método de digestão úmida; S-SO<sub>4</sub> extraído com CaHPO<sub>4</sub> 500 mg L<sup>-1</sup> e P e K determinados pelo método do Mehlich I.” (Bibliografia: Boletim Técnico n. 5, Tedesco *et al.*, 1995).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

**APÊNDICE C - ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 0 - 10 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO**

Tratamento	Cu	Zn	B	Relações Molares		
	mg dm <sup>-3</sup>			Ca/Mg	(Ca+Mg)/K	K/(Ca+Mg) <sup>1/2</sup>
T1	1,0	1,0	0,8	2,6	52,0	0,06
T2	1,1	0,9	0,7	3,0	48,0	0,06
T3	1,1	1,0	1,0	2,8	45,8	0,07
T4	1,1	0,9	0,9	2,6	47,4	0,07
T5	1,3	1,3	0,8	2,5	58,4	0,06
T6	1,3	1,0	1,0	2,7	39,3	0,08

"Cu, Zn e B extraídos com Mehlich I." (Bibliografia: Manual de Análises Químicas de Solo. Plantas e Fertilizantes. Embrapa, 2009).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

**APÊNDICE D – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 10 - 20 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO**

Tratamento	pH água	Ca	Mg	CTC efetiva	Al	H+Al	Saturação (%)		Índice SMP
		cmol dm <sup>-3</sup>			cmol dm <sup>-3</sup>		Al	Bases	
T1	5,1	6,6	2,1	9,4	0,4	2,5	4,6	78,4	6,5
T2	5,1	6,3	1,9	8,8	0,5	3,1	5,5	72,7	6,3
T3	5,2	6,9	2,1	9,7	0,4	5,5	3,9	62,8	5,8
T4	5,3	6,2	2,1	8,7	0,2	4,4	2,9	65,8	6,0
T5	5,3	7,1	2,5	10,0	0,2	2,2	2,3	81,6	6,6
T6	5,4	5,6	1,9	8,0	0,3	4,4	3,8	63,5	6,0

“pH em água 1:1; Ca, Mg e Al trocáveis com KCl 1M e CTC a pH 7,0” (Bibliografia: Boletim Técnico 05 Tedesco *et al.*, 1995). Índice SMP (Bibliografia: Solução Tampão TSM: Toledo, J. 2011).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

**APÊNDICE E – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 10 - 20 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO**

Tratamento	MO	S	P-Mehlich	K	CTC pH7	K
	%	mg dm <sup>-3</sup>			cmol dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>
T1	0,8	25,1	15,3	0,2	11,4	80,0
T2	0,8	23,0	3,8	0,2	11,5	64,0
T3	0,7	27,0	6,5	0,2	14,8	88,0
T4	0,6	21,4	3,0	0,2	12,9	64,0
T5	0,8	15,6	3,5	0,2	12,0	80,0
T6	0,6	17,1	6,4	0,2	12,1	64,0

“MO determinada pelo método de digestão úmida; S-SO<sub>4</sub> extraído com CaHPO<sub>4</sub> 500 mg L<sup>-1</sup> e P e K determinados pelo método do Mehlich I.” (Bibliografia: Boletim Técnico n. 5, Tedesco *et al.*, 1995).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

**APÊNDICE F – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 10 - 20 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO**

Tratamento	Cu	Zn mg dm <sup>-3</sup>	B	Relações Molares		
				Ca/Mg	(Ca+Mg)/K	K/(Ca+Mg) <sup>1/2</sup>
T1	1,2	0,7	0,8	3,1	42,6	0,07
T2	1,1	0,6	0,6	3,2	50,0	0,06
T3	1,2	0,7	0,8	3,2	40,3	0,08
T4	1,0	0,6	0,6	3,0	50,7	0,06
T5	1,0	0,6	0,6	2,9	46,7	0,07
T6	1,0	0,5	0,7	2,9	45,8	0,06

"Cu, Zn e B extraídos com Mehlich I." (Bibliografia: Manual de Análises Químicas de Solo. Plantas e Fertilizantes. Embrapa, 2009).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

**APÊNDICE G – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 20 - 40 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO**

Tratamento	pH água	Ca	Mg	CTC efetiva	Al	H+Al	Saturação (%)		Índice SMP
		cmol dm <sup>-3</sup>			cmol dm <sup>-3</sup>		Al	Bases	
T1	5,3	4,5	1,3	6,3	0,4	2,2	6,2	73,4	6,6
T2	5,3	3,7	1,1	5,7	0,7	2,0	12,5	71,1	6,7
T3	5,1	4,2	1,2	6,2	0,7	2,2	11,5	70,8	6,6
T4	5,4	4,2	1,3	5,7	0,1	1,2	2,1	82,6	7,1
T5	5,1	5,5	1,7	8,1	0,8	5,5	9,3	57,3	5,8
T6	5,2	3,5	1,0	5,2	0,6	2,0	11,2	70,4	6,7

“pH em água 1:1; Ca, Mg e Al trocáveis com KCl 1M e CTC a pH 7,0” (Bibliografia: Boletim Técnico 05 Tedesco *et al.*, 1995). Índice SMP (Bibliografia: Solução Tampão TSM: Toledo, J. 2011).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

**APÊNDICE H – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 20 - 40 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO**

Tratamento	MO	S	P-Mehlich	K	CTC pH7	K
	%	mg dm <sup>-3</sup>			cmol dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>
T1	0,2	17,4	2,3	0,12	8,1	48,0
T2	0,3	15,4	2,4	0,10	7,0	40,0
T3	0,2	21,6	1,8	0,10	7,7	40,0
T4	0,2	7,3	2,7	0,11	6,7	44,0
T5	0,4	10,2	3,0	0,13	12,8	52,0
T6	0,2	12,9	3,7	0,15	6,6	60,0

“MO determinada pelo método de digestão úmida; S-SO<sub>4</sub> extraído com CaHPO<sub>4</sub> 500 mg L<sup>-1</sup> e P e K determinados pelo método do Mehlich I.” (Bibliografia: Boletim Técnico n. 5, Tedesco *et al.*, 1995).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

**APÊNDICE I – ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 20 - 40 CM POSTERIOR À COLHEITA DO EXPERIMENTO**

Tratamento	Cu	Zn	B	Relações Molares		
				Ca/Mg	(Ca+Mg)/K	K/(Ca+Mg) <sup>1/2</sup>
T1	0,8	0,4	0,5	3,4	47,4	0,05
T2	0,8	0,4	0,6	3,3	47,8	0,05
T3	0,8	0,4	0,5	3,6	52,5	0,04
T4	0,8	0,4	0,5	3,3	47,9	0,05
T5	1,0	0,5	0,5	3,2	54,2	0,05
T6	0,7	0,4	0,5	3,4	29,4	0,07

“Cu, Zn e B extraídos com Mehlich I.” (Bibliografia: Manual de Análises Químicas de Solo. Plantas e Fertilizantes. Embrapa, 2009).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

## APÊNDICE J – APLICAÇÃO FOLIAR DE DEFENSIVOS AGRÍCOLAS PARA O MANEJO DA SOJA

Data	Fenologia	Hora inicial	Hora final	Temp. (°C)	UR%	Vel. Vento	
05/11/2020	<b>Condição do solo</b>		<b>Nebulosidade/Radiação</b>		<b>Direção do vento</b>		
	Seco		Céu limpo/1992 kj/m <sup>2</sup>		124°		
	<b>Data</b>	<b>Fenologia</b>	<b>Hora inicial</b>	<b>Hora final</b>	<b>Temp. (°C)</b>	<b>UR%</b>	<b>Vel. Vento</b>
		V3	20:00	20:35	26,3	72	0,6 m/s
*Aplicação 30/11/2020	<b>Condição do solo</b>		<b>Nebulosidade/Radiação</b>		<b>Direção do vento</b>		
	Seco		Nublado/25,96 kj/m <sup>2</sup>		106°		
	<b>Data</b>	<b>Fenologia</b>	<b>Hora inicial</b>	<b>Hora final</b>	<b>Temp. (°C)</b>	<b>UR%</b>	<b>Vel. Vento</b>
		V6	20:00	20:35	26,9	56	0,6 m/s
**Aplicação 30/12/2021	<b>Condição do solo</b>		<b>Nebulosidade/Radiação</b>		<b>Direção do vento</b>		
	Seco		Nublado/25,96 kj/m <sup>2</sup>		106°		
	<b>Data</b>	<b>Fenologia</b>	<b>Hora inicial</b>	<b>Hora final</b>	<b>Temp. (°C)</b>	<b>UR%</b>	<b>Vel. Vento</b>
		R1	17:30	19:30	22,8	70	3,0 m/s
**Aplicação 19/01/2021	<b>Condição do solo</b>		<b>Nebulosidade/Radiação</b>		<b>Direção do vento</b>		
	Seco		Céu limpo/1992 kj/m <sup>2</sup>		124°		
	<b>Data</b>	<b>Fenologia</b>	<b>Hora inicial</b>	<b>Hora final</b>	<b>Temp. (°C)</b>	<b>UR%</b>	<b>Vel. Vento</b>
		R3	20:00	20:35	24,7	83	0,6 m/s
**Aplicação 01/02/2021	<b>Condição do solo</b>		<b>Nebulosidade/Radiação</b>		<b>Direção do vento</b>		
	Seco		Nublado/25,96 kj/m <sup>2</sup>		106°		
		R5	20:00	20:35	26,07	80	0,6 m/s
**Aplicação 22/02/2021	<b>Condição do solo</b>		<b>Nebulosidade/Radiação</b>		<b>Direção do vento</b>		
	Seco		Nublado/25,96 kj/m <sup>2</sup>		106°		

\*Pulverização foliar Herbicida Crucial (3,0 L de p.c ha<sup>-1</sup>) e Fungicida Select (0,45 L de p.c ha<sup>-1</sup>).

\*\* Pulverização foliar Fungicida Unizeb Gold (3 kg de p.c ha<sup>-1</sup>); Fungicida Fox Xpro (0,5 L de p.c ha<sup>-1</sup>) e adjuvante Aureo (0,25 % v/v de p.c ha<sup>-1</sup>).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

## APÊNDICE K – DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES, AVALIAÇÕES E FENOLOGIA DA CULTURA DURANTE A CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

Avaliação	Descrição*	Data	Fenologia**
A1	Instalação do experimento	07/11/2020	-
A2	Aplicação do herbicida	30/11/2020	V3
A3	Aplicação do fungicida	30/12/2021	V6
A4	Aplicação do fungicida	19/01/2021	R1
A5	Aplicação do fungicida	01/02/2021	R3
A6	Aplicação do fungicida	22/02/2021	R5
A7	Avaliação Altura da Planta	26/02/2021	R5.1
A8	Avaliação Índice de Área Foliar	26/02/2021	R5.1
A9	Avaliação Número de Nós na Haste Principal	26/02/2021	R5.1
A10	Número Total de Legumes	26/02/2021	R5.1
A11	Colheita	22/04/2021	R8
A12	Peso de Mil Grãos	22/04/2021	R8
A13	Produtividade	22/04/2021	R8

\* Variáveis avaliadas;

\*\* Fenologia da cultura (anexo 1): escala (Fehr e Caviness, 1977).

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

**APÊNDICE L – INCREMENTO DE PRODUTIVIDADE ASSOCIADO À UTILIZAÇÃO DA TECNOLOGIA DO CA ASSOCIADO AO SI. TRABALHOS REALIZADOS EM DIVERSAS REGIÕES DO BRASIL, E EM DISTINTOS ANOS AGRÍCOLAS**

Culturas	Regional Sul	Regional Sudeste	Regional Centro Norte	Regional Centro Oeste
2022				
<b>Soja (sc ha<sup>-1</sup>)</b>	3,7** (2)*	6,6** (4)*	4,1** (5)*	10,7** (1)*
<b>Milho (sc ha<sup>-1</sup>)</b>	11,5** (1)*		20** (1)*	
<b>Tabaco (@ ha<sup>-1</sup>)</b>	1,8** (1)*			
<b>Erva mate (@ ha<sup>-1</sup>)</b>	218** (3)*			
<b>Feijão (sc ha<sup>-1</sup>)</b>			7,6** (1)*	
Instituição de pesquisa				
<b>Soja (sc ha<sup>-1</sup>)</b>	3,3** (4)*		7,8** (3)*	3,6** (8)*
<b>Milho (sc ha<sup>-1</sup>)</b>				6,8** (3)*
<b>Feijão (sc ha<sup>-1</sup>)</b>			6,3** (1)*	
2021				
<b>Soja (sc ha<sup>-1</sup>)</b>	8,9** (16)*	9** (2)*	4,4** (2)*	8,7** (2)*
<b>Milho (sc ha<sup>-1</sup>)</b>		15,4** (1)*	14,2** (5)*	
<b>Tabaco (@ ha<sup>-1</sup>)</b>	2,14** (3)*			
<b>Arroz (sc ha<sup>-1</sup>)</b>	28,5** (2)*			
<b>Melancia (ton ha<sup>-1</sup>)</b>	20** (1)*			
<b>Pimentão (kg ha<sup>-1</sup>)</b>	336** (1)*			
<b>Batata Doce (cx ha<sup>-1</sup>)</b>	90** (1)*			
<b>Jiló (cx ha<sup>-1</sup>)</b>	120** (1)*			
<b>Laranja (cx ha<sup>-1</sup>)</b>	241** (1)			
<b>Trigo (sc ha<sup>-1</sup>)</b>		4,9** (1)*		
<b>Amendoim (sc ha<sup>-1</sup>)</b>		9,1** (1)*		
<b>Feijão (sc ha<sup>-1</sup>)</b>		5,7** (1)*		
<b>Tomate (ton ha<sup>-1</sup>)</b>		24,0** (1)*	23,4** (2)*	
<b>Cana de Açúcar (ton ha<sup>-1</sup>)</b>		14,3** (6)*		
Instituição de pesquisa				
<b>Soja (sc ha<sup>-1</sup>)</b>			8,5** (3)*	
<b>Feijão (sc ha<sup>-1</sup>)</b>			7,8** (1)*	
<b>Milho (sc ha<sup>-1</sup>)</b>			15,5** (1)*	
<b>Algodão (sc ha<sup>-1</sup>)</b>			18,6** (1)*	
<b>Amendoim (sc ha<sup>-1</sup>)</b>		48,9** (2)*		
2020				
<b>Soja (sc ha<sup>-1</sup>)</b>	7,3** (22)*	7,8** (8)	10,0** (2)*	
<b>Milho (sc ha<sup>-1</sup>)</b>	10,6** (3)*			
<b>Tabaco (@ ha<sup>-1</sup>)</b>	1,8** (2)*			
<b>Amendoim (sc ha<sup>-1</sup>)</b>		14,0** (1)*		
<b>Cana de Açúcar (ton ha<sup>-1</sup>)</b>		14,7** (1)*		
Instituição de pesquisa				
<b>Soja (sc ha<sup>-1</sup>)</b>	6,8 ** (1)*		3,8** (2)*	7,5** (3)*
<b>Feijão (sc ha<sup>-1</sup>)</b>			7,8** (1)*	
<b>Arroz (sc ha<sup>-1</sup>)</b>	25,5** (1)*			
<b>Milho (sc ha<sup>-1</sup>)</b>		3,4** (1)*		
<b>Maça (ton ha<sup>-1</sup>)</b>	9,4 T** (1)*			

(\*) número de trabalhos realizados (\*\*) média de incremento de produtividade

Fonte: elaborado pelo autor (2023).