

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**MAGNÉSIO VIA FOLIAR PARA ATENUAÇÃO DE
ESTRESSE FISIOLÓGICO DE HERBICIDAS NA SOJA
ENLIST**

GIUZEPPE AUGUSTO MARAM CANEPPELE

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2025**

MAGNÉSIO VIA FOLIAR PARA ATENUAÇÃO DE ESTRESSE FISIOLÓGICO DE HERBICIDAS NA SOJA ENLIST

GIUZEPPE AUGUSTO MARAM CANEPPELE

Engenheiro Agrônomo

Orientador: PROF. DR. ELCIO FERREIRA DOS SANTOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

Dourados

Mato Grosso do Sul

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

C221m Caneppele, Giuseppe Augusto Maram
MAGNÉSIO VIA FOLIAR PARA ATENUAÇÃO DE ESTRESSE FISIOLÓGICO DE
HERBICIDAS NA SOJA ENLIST [recurso eletrônico] / Giuseppe Augusto Maram Caneppele. --
2025.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Elcio Ferreira Dos Santos.

Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2025.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Glycine max. 2. Metabolismo fotossintético. 3. Trocas gasosas. 4. Glyphosate. 5. 2,4-D sal de colina. I. Santos, Elcio Ferreira Dos. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

**MAGNÉSIO VIA FOLIAR PARA ATENUAÇÃO DE ESTRESSE FISIOLÓGICO DE
HERBICIDAS NA SOJA ENLIST**
por

GIUZEPE AUGUSTO MARAM CANAPPELE

Tese apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
MESTRE EM AGRONOMIA

Aprovada em: 29/10/2025.

Documento assinado digitalmente
 **ELCIO FERREIRA DOS SANTOS**
Data: 05/11/2025 17:54:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Elcio Ferreira Dos Santos
Orientador – UFGD

Documento assinado digitalmente
 **GUTIERRES NELSON SILVA**
Data: 06/11/2025 07:50:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prot Dr. Gutierres Nelson Silva - IFMS Nova Andradina

Documento assinado digitalmente
 **CLEBERTON CORREIA SANTOS**
Data: 07/11/2025 09:07:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – UFGD

DEDICATÓRIA

Dedico o presente estudo primeiramente à Deus, e em especial aos meus pais Marilene Maram Caneppele e Emiliano Marcelo Galle Caneppele, que me apresentaram a beleza da agricultura e me ensinaram a amar a terra com respeito e gratidão, a minha noiva Marielly Maria Vitória Dumke e ao meu irmão e minha cunhada Luigi Gustavo Maram Caneppele e Luana Martins Rocha, com todo meu amor, carinho e enorme gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço antes de tudo ao Senhor Deus, por me prover saúde e proporcionar a realização deste trabalho.

A toda a minha família, pela força, união e impulsão que me proporcionaram para realizar esse desejo. A minha mãe Marilene Maram Caneppele e ao meu pai Emiliano Marcelo Galle Caneppele, que jamais deixaram de me apoiar, e confiar em mim e no meu sonho, no decorrer de todos esses anos de graduação e pós-graduação, e agradecer ao meu irmão e minha cunhada Luigi Gustavo Maram Caneppele Caneppele e Luana Martins Rocha, minha noiva Marielly Maria Vitoria Dumke, por sempre estarem do meu lado em todos os momentos em que precisei de ajuda me apoiando e me compreendendo.

Agradeço a todos da Universidade Federal da Grande Dourados, profissionais e mestres, que de alguma forma contribuíram para a minha formação. A todos os docentes que não mediram esforços para a passagem de conhecimento. A todos os colegas da turma nesses anos de graduação em especial a meus amigos: Robson Alves Ribeiro, Daniela Maria Barros, José Thiago Battaglin, Álvaro Crivellaro, Oscar Xavier Zanchet, Leonardo Soares Dias, Heitor Nunes Santana, Naara Rafaela Pereira da Silva, Luiz Eduardo de Moraes Fernandes Fontes, Ana Beatriz Pires da Silva, Dijovano Dal Castel, Larissa Michaela Cavalvante dos Santos, Moacir de Souza da Silva, Diego dos Santos Dantas, Flávia Maria de Oliveira, Samuel Fabrício da Silva Santos, Camile Figueiredo Oliveira, José Leandro de França, Julia dos Santos Marques e Rayssa Paz Monteiro que sempre me ouviram e me apoiaram.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos durante meu curso de mestrado. Esse apoio foi essencial para que eu pudesse me dedicar à pesquisa e alcançar os objetivos propostos. Recebam meu reconhecimento e apreço por investirem na formação de pesquisadores e no avanço do conhecimento científico.

Aos meus amigos que me apoiaram Juliano Bortoluzzi Lorenzetti, Maikon Tiago Yamada Danilussi, Felipe Ortolan Dazzi, Guilherme Rossano dos Santos, Abilio Felipe Oliveira Lopes, Miguel Barros, Edson Rocha Domingos, Cristian Ariel Benites, Andres Junior Matos Gaona, Phelipe Finger Sanches, Bianca Carolina Bariquelo e aos familiares Franscenco Nathan da Fonseca Caneppele, Maria Spínola Maram, Valdemir Maram, Maria Spínola Maram, Valdemir Maram, Diogo Marran Teixeira, Lucas da Silva Caneppele e Vincenzo Davide Muller Caneppele.

Em especial aos professores que colaboraram Prof. Dr. Cleberton Correia Santos, Prof. Dr. Alfredo Junior Paiola Albrecht e Prof. Dr. Leandro Paiola Albrecht.

A meu orientador, Prof. Dr. Elcio Ferreira Dos Santos, pelo ensino, paciência, acompanhamento, orientação, colaboração, compreensão, atenção e dedicação que foi repassado nesses anos de formação.

Muito Obrigado!

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. REVISÃO DA LITERATURA	8
2.1 Soja.....	8
2.2 Plantas daninhas	8
2.3 Enlist™ E3	8
2.4 Glyphosate.....	9
2.5 2,4-D Sal de colina.....	9
2.6 Glufosinato de amônio	11
2.7 Estresse fisiológico.....	11
2.8 Magnésio	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1 Caracterização das áreas experimentais	17
3.2 Condução do experimento.....	18
3.3 Avaliação da fitotoxicidade de herbicidas	21
3.4 Análise nutricional do tecido vegetal.....	23
3.5 Avaliação de produtividade.....	23
3.6 Parâmetros de trocas gasosas	24
3.7 Determinação de Açúcares Totais e Sacarose nas Folhas.....	24
3.8 Pigmentos fotossintéticos.....	24
3.9 Compostos de nitrogênio.....	25
3.10 Análises estatísticas.....	25
4. RESULTADOS	26
5. DISCUSSÃO	36
6. CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

MAGNÉSIO VIA FOLIAR PARA ATENUAÇÃO DE ESTRESSE FISIOLÓGICO DE HERBICIDAS NA SOJA ENLIST

Giuseppe Augusto Maram Caneppele

Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD

Programa de Pós-Graduação em Agronomia – PPGAG

Linha de Pesquisa: Sistemas integrados de produção vegetal / Fertilidade e nutrição de plantas

RESUMO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma das principais culturas do Brasil, e o uso de cultivares tolerantes a herbicidas, como a soja Enlist™ E3, facilita o manejo de plantas daninhas, mas pode provocar estresses fisiológicos que comprometem a produtividade. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação foliar de magnésio (Mg) na atenuação do estresse fisiológico causado por esses herbicidas na soja Enlist™ E3. O estudo foi conduzido meio de três experimentos em campo no Mato Grosso do Sul, (Caarapó, Dourados e Juti), durante a safra 2024/2025, em área com soja Enlist™ E3. foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5 x 5, sendo cinco doses de Mg (0, 50, 100, 150 e 200 g ha⁻¹), utilizando-se sulfato de magnésio como fonte, e cinco herbicidas, sem capina, glyphosate (1500 g e.a. ha⁻¹), 2,4-D sal de colina (1000 g e.a. ha⁻¹), glufosinato (500 g e.a. ha⁻¹), e capina. As parcelas experimentais mediram 3 × 5 metros. Permitiu avaliar de forma integrada os efeitos dos herbicidas e da adubação foliar sobre a cultura da soja Enlist™ E3. Foram mensurados parâmetros fisiológicos, análise nutricional do tecido vegetal, taxa fotossintética, condutância estomática e transpiração, teores de pigmentos fotossintéticos, compostos de nitrogênio, determinação de açúcares totais e sacarose nas folhas. Também foram avaliados sintomas visuais de fitotoxicidade e rendimento final de grãos. Os dados foram analisados por meio de variância e regressão. Para fatores qualitativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%. Para fatores quantitativos, os modelos de regressão foram selecionados com base na significância dos coeficientes (teste t), no coeficiente de determinação (r²) e na coerência biológica do ajuste. Os resultados obtidos evidenciaram que os herbicidas, afetaram negativamente a fisiologia da soja Enlist™ E3. Foram observadas reduções significativas na taxa fotossintética, no acúmulo de açúcares solúveis e na concentração de pigmentos fotossintéticos, além de aumento nos sintomas de fitotoxicidade. Entretanto, a suplementação foliar de magnésio mostrou-se altamente eficiente em atenuar esses efeitos adversos. A adubação foliar elevou os teores de magnésio nos tecidos foliares, promovendo maior integridade dos pigmentos fotossintéticos e favorecendo a manutenção da atividade fotossintética. Observou-se ainda aumento na condutância estomática, elevação na concentração de açúcares. Esses benefícios se refletiram diretamente na produtividade. A aplicação foliar de magnésio reduziu os sintomas de estresse oxidativo, elevou os teores foliares do nutriente, aumentou a eficiência fotossintética, o acúmulo de açúcares e a produtividade da soja, especialmente em áreas sem mato competição. Concluiu-se que a suplementação foliar com Mg é prática viável e eficaz para atenuar efeitos de herbicidas e favorecer o desempenho produtivo da cultura.

Palavras-chave: *Glycine max*, metabolismo fotossintético, trocas gasosas, glyphosate, 2,4-D sal de colina, glufosinato de amônio.

FOLIAR MAGNESIUM FOR MITIGATING PHYSIOLOGICAL STRESS FROM HERBICIDES IN SOYBEANS ENLIST

Giuseppe Augusto Maram Caneppele

Federal University of Grande Dourados – UFGD

Graduate Program in Agronomy – PPGAG

Research Line: Integrated plant production systems / Plant fertility and nutrition

ABSTRACT

Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) is one of Brazil's main crops, and the use of herbicide-tolerant cultivars, such as Enlist™ E3 soybean, facilitates weed management but can cause physiological stress that compromises productivity. Given this, the present study aimed to evaluate the effects of foliar application of magnesium (Mg) in mitigating the physiological stress caused by these herbicides in Enlist™ E3 soybeans. The study was conducted through three field experiments in Mato Grosso do Sul (Caarapó, Dourados, and Juti) during the 2024/2025 harvest in an area planted with Enlist™ E3 soybeans. It was conducted in a completely randomized design, in a 5 x 5 factorial scheme, with five doses of Mg (0, 50, 100, 150, and 200 g ha⁻¹), using magnesium sulfate as the source, and five herbicides, without weeding: glyphosate (1500 g a.e. ha⁻¹), 2,4-D choline salt (1000 g a.e. ha⁻¹), glufosinate (500 g a.e. ha⁻¹), and weeding. The experimental plots measured 3 × 5 meters. This allowed for an integrated assessment of the effects of herbicides and foliar fertilization on the Enlist™ E3 soybean crop. Physiological parameters, nutritional analysis of plant tissue, photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration, photosynthetic pigment content, nitrogen compounds, total sugars, and sucrose in the leaves were measured. Visual symptoms of phytotoxicity and final grain yield were also evaluated. The data were analyzed using variance and regression. For qualitative factors, the means were compared using Tukey's test at 5%. For quantitative factors, regression models were selected based on the significance of the coefficients (t-test), the coefficient of determination (r²), and the biological consistency of the fit. The results showed that herbicides negatively affected the physiology of Enlist™ E3 soybeans. Significant reductions were observed in the photosynthetic rate, accumulation of soluble sugars, and concentration of photosynthetic pigments, in addition to an increase in phytotoxicity symptoms. However, foliar magnesium supplementation proved to be highly effective in mitigating these adverse effects. Foliar fertilization increased magnesium levels in leaf tissues, promoting greater integrity of photosynthetic pigments and favoring the maintenance of photosynthetic activity. An increase in stomatal conductance and sugar concentration was also observed. These benefits were directly reflected in productivity. Foliar application of magnesium reduced physiological stress symptoms, increased foliar nutrient levels, increased photosynthetic efficiency, sugar accumulation, and soybean productivity, especially in areas without weed competition. It was concluded that foliar supplementation with Mg is a viable and effective practice to mitigate the effects of herbicides and promote crop productivity.

Keywords: *Glycine max*, photosynthetic metabolism, gas exchange, glyphosate, 2,4-D choline salt, ammonium glufosinate.

1. INTRODUÇÃO

Uma das culturas mais importantes do Brasil e do mundo é a soja (*Glycine max* (L.) Merrill), ela tem um papel importante e expressivo na economia agrícola e na geração de produtos derivados, como óleo e farelo de soja. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), a safra brasileira de soja 2024/2025 alcançou 169 milhões de toneladas, com área cultivada estimada em 47,6 milhões de hectares, o que demonstra um crescimento constante levando a consolidação do país como líder mundial na produção desta oleaginosa. No Mato Grosso do Sul, a soja é a principal cultura agrícola, com 4,5 milhões de hectares cultivados, constituindo uma significativa contribuição para a produção nacional (CONAB, 2024).

É notável que cada vez mais, se torna necessário enfrentar a pressão crescente de plantas daninhas resistentes e realizar buscas que reduzam perdas econômicas, e nesse cenário a biotecnologia Enlist™ E3 tem desempenhado papel central no manejo da soja. A tecnologia é constituída por cultivares geneticamente modificadas resistentes a múltiplos herbicidas, incluindo glyphosate, glufosinate e 2,4-D sal de colina, proporcionando métodos mais eficientes para o controle de espécies resistentes e diminuindo impactos negativos sobre a produtividade (Fast et al., 2016; Corteva, 2023). Contudo, mesmo essas novas cultivares tolerantes podem apresentar respostas fisiológicas adversas quando submetidas a condições de estresse, como alta radiação, déficit hídrico ou solos com baixa disponibilidade de nutrientes, manifestando sintomas como redução da fotossíntese, clorose, necrose foliar e alterações no metabolismo antioxidante (Moraes et al., 2024; Heap & Duke, 2018).

Os herbicidas apresentam função fundamental no manejo de plantas daninhas. O glyphosate, derivado da glicina, age inibindo a enzima 5-enolpiruvilshiquimato-3-fosfato sintase (EPSPS), o que causa o bloqueio da via do shikimato, acontecimento essencial para a síntese de aminoácidos aromáticos, como fenilalanina, tirosina e triptofano (Rodrigues & Almeida, 2018). Esse bloqueio da via de shikimato causa diminuição da produção de proteínas e metabólitos secundários, o que interfere no crescimento vegetativo, na formação de órgãos e ocasiona sintomas de fitotoxicidade, como clorose intervenal, necrose e redução do alongamento do pecíolo (Moraes et al., 2024).

O 2,4-D sal de colina, por sua vez, é um herbicida sistêmico que age como mimetizador de auxinas, gerando modificações na divisão celular, alongação do caule e das raízes e distúrbios na diferenciação tecidual. Estudos trazem que o 2,4-D causa acidificação da parede celular devido à ativação excessiva da bomba de prótons (H^+ -ATPase), desequilíbrio hormonal, epinastia foliar, redução da eficiência fotossintética e eventual morte da planta (Silva et al., 2020; Taiz et al., 2017).

O glufosinate-sal de amônio é outro herbicida largamente utilizado em cultivares Enlist™ E3, atuando como inibidor da glutamina sintetase (GS) e promovendo acúmulo de amônio nos tecidos. Esse acúmulo resulta em desequilíbrio osmótico, produção elevada de espécies reativas de oxigênio (EROs), peroxidação lipídica e morte celular rápida, mesmo em plantas tolerantes (Coetzer & Al-Khatib, 2001; Takano et al., 2020).

Considerando todas essas ações fisiológicas causadas por herbicidas, o magnésio fica responsável por algumas funções estratégicas, como a mitigação do estresse oxidativo e na manutenção da fotossíntese e da integridade celular. O Mg é peça principal da clorofila e age na ativação de enzimas essenciais para o metabolismo do carbono e nitrogênio, como Rubisco e ADP-glicose pirofosforilase, além de estabilizar ATP, membranas e ribossomos (Marschner, 2012; Hermans et al., 2013; Li et al., 2023). Estudos recentes trazem que a aplicação foliar de Mg contribui para maior resistência a estresses induzidos por herbicidas pois aumenta a capacidade antioxidante das plantas, reduz a formação de EROs e melhora a eficiência fotossintética (Rodrigues et al., 2021).

Diante disso, o presente estudo tem a hipótese que os efeitos negativos de herbicidas (glyphosate, 2,4-D sal de colina e glufosinato de amônio) no metabolismo fisiológico da soja Enlist™ E3 podem ser atenuados pela suplementação foliar de magnésio (Mg) que por sua vez mantêm a integridade estrutural celular e do tecido vegetal por meio do aumento do metabolismo de carboidrato e de nitrogênio, impactando positivamente na produtividade e capacidade fotossintética de plantas de soja. Com base nessa hipótese, o objetivo com este estudo é avaliar o uso de Mg via foliar para atenuação de estresse fisiológico de herbicidas na soja Enlist™ E3 após a aplicação dos herbicidas glyphosate, 2,4-D sal colina e glufosinato de amônio.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Soja

O Brasil é o maior produtor de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) do mundo com 169 milhões de toneladas de soja na safra 2024/2025. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), a área cultivada com soja na safra 2024/25 foi estimada em 47,6 milhões de hectares, representando crescimento em relação ao ciclo anterior e evidenciando a contínua expansão da oleaginosa no país. A importância econômica da cultura da soja justifica o desenvolvimento de tecnologias e estratégias para mitigar os impactos de estresses bióticos e abióticos que possam comprometer sua produtividade (Embrapa, 2025).

No Mato Grosso do Sul, a soja também se destaca como a principal cultura agrícola. A área cultivada no estado foi estimada em 4,5 milhões de hectares na safra 2024/25 (CONAB, 2024), confirmando a relevância regional e sua contribuição significativa para a produção nacional.

2.2 Plantas daninhas

Vem aumentando no Brasil os casos de resistência de plantas daninhas ao glifosato desde 2003, com destaque para espécies como buva (*Conyza spp.*), capim-amargoso (*Digitaria insularis*) e caruru (*Amaranthus hybridus*), que já causam grandes prejuízos à soja. Atualmente, são registradas 12 espécies resistentes ao glifosato no país, afetando milhões de hectares de lavouras. A Embrapa estima perdas econômicas na soja de aproximadamente R\$ 9 bilhões ao ano devido à resistência. Estratégias integradas de manejo são indispensáveis para reduzir a evolução desses biótipos resistentes (Embrapa, 2023).

No Brasil existem diversas espécies de plantas daninhas com resistências simples, múltipla ou cruzada a herbicidas, como a buva (*Conyza spp.*) e o capim-amargoso (*Digitaria insularis*), e tolerância a herbicidas como a trapoeraba (*Commelina benghalensis* L.) (HEAP, 2025). Isso traz a necessidade do uso herbicidas dentro da cultura da soja e a utilização de uma soja que permita essas aplicações.

2.3 Enlist™ E3

Com o objetivo de diminuir os impactos de uso constante de um mesmo herbicida, a tecnologia Enlist™ E3, variedade de soja geneticamente modificada

desenvolvida pela MS Technologies e Dow AgroSciences vem se destacando no Brasil, elaborada para ser resistente a múltiplos ingredientes ativos, incluindo glyphosate, glufosinato e 2,4-D (Fast et al., 2016).

Com o surgimento dessa biotecnologia, existe falta de informações sobre o comportamento fisiológico dessa cultivar quando submetida à aplicação de herbicidas e suas combinações à base de glyphosate, 2,4-D e glufosinato de amônio (Oliveira, 2019).

2.4 Glyphosate

Dentre os herbicidas amplamente utilizados na soja o glyphosate é um herbicida derivado da glicina, é um inibidor da EPSPs, ou seja, um herbicida que inibe a produção da enzima 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase (EPSPS), e apresenta solubilidade em água de 15.700 mg/L (25°C), Kow de 0,0006-0,0017 e sobre o comportamento na planta, a absorção é foliar através da cutícula, a translocação principalmente pelo simplasto, tanto para as folhas e meristemas aéreos como para os subterrâneos, a degradação é microbiana (Rodrigues e Almeida, 2018).

O glyphosate inibe a enzima 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase (EPSPS), após a absorção foliar, bloqueando assim a via do shikimato, encarregado de realizar a síntese de aminoácidos aromáticos essenciais, como fenilalanina, tirosina e triptofano (Rodrigues e Almeida, 2018). A inibição dessa via prejudica a produção de proteínas e metabólitos secundários, interferindo no crescimento vegetativo e na formação de órgãos, como folhas e raízes, o que ocasiona sintomas de fitotoxicidade, como clorose intervenal, necrose foliar, encarquilhamento das folhas, redução do alongamento do pecíolo e morte de meristemas jovens (Monteiro et al., 2024).

As cultivares soja Enlist™ E3, sendo geneticamente tolerantes ao glyphosate, ainda podem sofrer com sintomas leves e temporários quando passam por estados de estresse fisiológico, como déficit hídrico, alta radiação solar ou solos com baixa disponibilidade de nutrientes (Monteiro et al., 2024; Heap; Duke, 2018).

2.5 2,4-D Sal de colina

O 2,4-D Sal de colina é um herbicida derivado de ácido fenoxiacético, é um mimetizador de auxina, ou seja, um herbicida sistêmico e seletivo que imita o efeito das auxinas nas plantas e sobre o comportamento na planta, a absorção é radicular e foliar, através da cutícula, a translocação principalmente pelo simplasto, tanto para as folhas e

meristemas aéreos como para os subterrâneos, a degradação é microbiana (Rodrigues e Almeida, 2018).

Interferindo na regulação do crescimento celular e na alongação do caule e das raízes, o 2,4-D, atua como mimetizador de auxinas e gera divisão celular descoordenada e distúrbios na diferenciação tecidual. Existe a acidificação da parede celular por causa da ativação excessiva da bomba de prótons (H^+ -ATPase), o que altera o potencial eletroquímico da membrana e amplia a plasticidade da parede, afetando a alongação celular. Esse herbicida também modifica a síntese e o transporte de auxinas e giberelinas, levando à acumulação de auxinas endógenas, desequilíbrio hormonal e sinalização incorreta, o que acarreta epinastia e deformações foliares. Todas essas modificações levam a um esgotamento das reservas energéticas e de carboidratos da planta, pois existe um consumo excessivo de ATP e redução da eficiência fotossintética. Consequentemente pode ocorrer uma eventual morte da planta, pois com todas essas alterações ocorre redução do alongamento celular, necrose em tecidos jovens, clorose intervenal, encarquilhamento foliar e deformações nos meristemas. (Silva et al., 2020; Taiz et al., 2017; Heap & Duke, 2018).

O magnésio é o componente central da clorofila, importante para a fotossíntese além de várias outras reações enzimáticas de metabolismo primário e por isso a deficiência dele na soja pode amplificar os efeitos do glyphosate e do 2,4-D. Quando ocorre a falta desse macronutriente, a eficiência fotossintética diminui, o que gera um maior acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) e torna as células mais propensas ao estresse oxidativo induzido pelos herbicidas. Essa deficiência também afeta a formação de ATP e as atividades de enzimas que utilizam aminoácidos aromáticos, intensificam a fitotoxicidade mesmo em cultivares tolerantes. Desse modo, mesmo em plantas tolerantes, a ausência de Mg em quantia adequada aumenta sintomas como clorose internerval e necrose foliar. Por outro lado, a quantidade correta de Mg contribui para uma melhor capacidade fotossintética, reduz a geração de EROs e modulação a tolerância da planta ao herbicida, diminuindo seus efeitos adversos sobre crescimento e desenvolvimento (Santos et al., 2007; Benevenuto et al., 202; Rodrigues & Almeida, 2018; Silva et al., 2020).

2.6 Glufosinato de amônio

O glufosinato-sal de amônio é um herbicida derivado do ácido fosfínico, é um herbicida inibidor da enzima glutamina sintetase (GS), e apresenta solubilidade em água de 1.350.000 mg/L (pH 7,0 e 20°C), e sobre o comportamento na planta, a absorção é foliar limitada tanto pelo floema como pelo xilema, a degradação é rapidamente por microrganismos no solo, ou na superfície da água, a ácido 3-metilfosfônicopropiônico e por último a CO₂. (Rodrigues e Almeida, 2018).

Quando o glufosinato é absorvido, ele bloqueia a atividade da enzima GS, responsável pela assimilação de amônio em glutamina, ocasionando o acúmulo tóxico de íon de amônio (NH₄⁺) nos tecidos. Esse acúmulo provoca desbalanço osmótico, inibição da fotossíntese e aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), provocando peroxidação lipídica e degradação de membranas celulares. E por consequência dessas ações, acontece a morte rápida das células expostas (Coetzer; Al-Khatib, 2001; Takano et al., 2020).

Na soja convencional, alguns sintomas de fitotoxicidade são mais comuns, incluindo: clorose intensa, necrose foliar, murcha, lesões necróticas irregulares e morte de tecidos fotossinteticamente ativos em poucos dias após a aplicação. Já em cultivares de soja Enlist™ E3, que apresentam tolerância ao glufosinato, podem ocorrer sintomas leves e temporários, como clorose marginal e leve necrose em condições de estresse fisiológico. (Silva et al., 2020; Heap; Duke, 2018).

Em condições de deficiência de Mg, a fotossíntese é gravemente comprometida, o estresse oxidativo é intensificado e o acúmulo de amônio na planta apresenta danos cada vez mais evidentes. (Cakmak; Yazici, 2001; Guo et al., 2015).

2.7 Estresse fisiológico

No entanto, o uso de herbicidas, como glyphosate, 2,4-D sal colina e glufosinato de amônio, ainda resulta em efeitos fisiológico na cultura, causando estresses fisiológicos e reduzindo seu potencial produtivo pois mesmo sendo tolerante, a aplicação de herbicidas existe a possibilidade de uma redução temporária da taxa fotossintética, acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) e alterações na atividade de antioxidantes, como glutathione redutase e peroxidases. Pois a planta ainda precisa metabolizar os herbicidas, ativando enzimas detoxificantes que consomem energia e cofatores, incluindo o magnésio. Os herbicidas são capazes de interferir na estabilidade

de membranas e fotossistemas, ampliando a produção de EROs o que requer maior resposta antioxidante para evitar danos oxidativos (Oliveira, 2019; Oliveira, 2024).

Dessa forma, é fundamental buscar alternativas que minimizem esses efeitos adversos. Dentre essas alternativas, destaca-se o uso de magnésio (Mg) via foliar na soja (Rodrigues et al, 2021).

2.8 Magnésio

O Mg é considerado um macronutriente essencial para as plantas pois desempenha funções metabólicas e estruturais essenciais. Ele é um elemento fundamental na molécula de clorofila, sendo importante ao processo fotossintético, atuando também na ativação de enzimas ligadas ao metabolismo do carbono e do nitrogênio, como a rubisco e a fosfoenolpiruvato carboxilase. O elemento também participa da transferência e armazenamento de energia celular, por meio da estabilização do trifosfato de adenosina (ATP), e da regulação do transporte de fotoassimilados no floema. Ademais, exerce papel na estabilização de ácidos nucleicos e na manutenção da integridade das membranas celulares, o que o torna primordial para o crescimento e desenvolvimento vegetal, especialmente sob condições de estresse fisiológico (Marschner, 2012; Oliveira et al., 2024; Vian A.L, Tiecher, T, 2025)

A literatura recente confirma que o magnésio, além de seu papel estrutural clássico, atua como um mitigador de estresses fisiológicos, auxiliando e contribuindo para maior rendimento e qualidade da produção, pois a adubação foliar de Mg colabora para elevar o teor relativo de água nas folhas, aumenta a concentração de parâmetros e pigmentos fotossintéticos, melhora o ajuste osmótico e a condutância estomática das plantas, promove redução de marcadores de estresse oxidativo e aumenta a atividade de enzimas antioxidantes como superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT), indicando assim que a suplementação foliar desse macronutriente desempenha papel relevante na manutenção da fisiologia vegetal sob déficit hídrico e reduz os efeitos prejudiciais do estresse oxidativo. (Santos et al., 2023; Rodrigues et al., 2021; Demicheli, N. H, 2023).

Atuando em dois níveis bioquímicos complementares, o magnésio apresenta uma função fundamental na fotossíntese, uma vez que opera na estrutura da clorofila e na organização supramolecular dos tilacoides. Estruturalmente nas moléculas de clorofila o Mg ocupa posição central do anel tetrapirrólico, sendo coordenado por quatro átomos de nitrogênio do núcleo porfirínico, o que permite a estabilização eletrônica da molécula e a absorção de fótons em comprimentos de onda específicos do espectro visível,

principalmente nas faixas do azul (~430 nm) e vermelho (~662 nm). Esse processo, processo garante a eficácia da transferência da energia de excitação para os centros de reação dos fotossistemas I e II (PSI e PSII), uma vez que a substituição ou perda do cátion leva à instabilidade do cromóforo e à degradação acelerada da clorofila (Marschner, 2012).

Ao mesmo tempo o magnésio neutraliza as cargas negativas dos grupos fosfato presentes nas membranas tilacoidais, reduzindo a repulsão eletrostática entre as lamelas e promovendo o empilhamento dos tilacoides na forma de grana. Esse processo bioquímico ocorre de forma estratégica, desse modo mantém a separação espacial entre PSII, predominantemente localizado nos grana, e PSI, concentrado nas lamelas estromais, sendo essa condição essencial para a eficiência do transporte vetorial de elétrons (Ahmed et al. 2023). Em circunstâncias de deficiência de Mg, observa-se a clorose internerval, característica decorrente da redução da síntese de clorofila, o desarranjo dos tilacoides, a diminuição da eficiência fotoquímica máxima (F_v/F_m) e ainda a perda do gradiente eletroquímico de prótons, o que resulta em queda da fotofosforilação e da taxa assimilatória líquida de CO_2 (Meng et al., 2023; Zhou et al., 2024).

O magnésio também é um elemento crucial no metabolismo energético vegetal, agindo na formação do complexo Mg-ATP: O Mg se liga ao trifosfato de adenosina, o que reduz a repulsão eletrostática entre os grupos fosfato, estabilizando assim a molécula para que a transferência do grupo fosfato ocorra de forma eficiente durante as reações de fosforilação. Na glicólise esse mecanismo se torna fundamental no ciclo de Calvin-Benson, na síntese de sacarose e amido e na ativação de diversas quinases envolvidas na regulação metabólica (Marschner, 2012; Hermans et al, 2013; Ahmed et al. 2023).

Ademais, a disponibilidade desse macronutriente determina a taxa de hidrólise de ATP nas reações catalisadas por ATPases de membrana, como a H^+ -ATPase do plasmalema e a H^+ -ATPase vacuolar, encarregados de realizar o estabelecimento de gradientes eletroquímicos que estimula o transporte ativo de nutrientes e a homeostase iônica celular (Ishfaq et al, 2022; Chen et al., 2015). Quando ocorre a deficiência de magnésio, a instabilidade do ATP livre reduz a atividade enzimática global, e ocorre o comprometimento de processos como a fotofosforilação e a respiração mitocondrial, o que pode ocasionar à queda da disponibilidade de energia livre (ΔG) para reações anabólicas, o que afeta diretamente o crescimento vegetal (Hermans et al., 2013; Zhou et al., 2024).

Agindo como cofator estrutural e funcional essencial para a estabilidade de ribossomos e ácidos nucleicos, o magnésio neutraliza cargas negativas no RNA e facilita a dobragem das moléculas ribossomais. Interage juntamente com fosfolipídios da membrana plasmática e de organelas, e assim equilibra as bicamadas lipídicas e mantém a fluidez das membranas, possibilitando o funcionamento correto de canais iônicos e transportadores. Torna-se crítica para a homeostase iônica, pois modula antagonismos com H^+ , Ca^{2+} e K^+ , equilibrando potenciais eletroquímicos e garantindo que gradientes de prótons energizassem processos vitais, como transporte ativo de solutos, sinalização celular e manutenção do pH estromático nos plastídios (Marschner, 2012; Hermans et al, 2013).

Para a biossíntese e mobilização de carboidratos, o magnésio é determinante, pois opera como cofator para enzimas dependentes de ATP, como a sacarose-fosfato sintase e a ADP-glicose pirofosforilase. Ele consolida o complexo Mg-ATP, o que promove síntese de sacarose no citosol e de amido nos plastídios e a transferência eficiente de grupos fosfato. Toda essa reação sustenta o carregamento de sacarose no floema (Ahmed et al. 2023; Zhou et al., 2024).

Após toda função bioquímica multifacetada anteriormente, a deficiência desse importante macronutriente se torna danosa, podendo ocorrer clorose internerval em folhas mais velhas por causa da mobilidade do Mg entre os tecidos. Também a limitação de Mg reduz a formação de Mg-ATP, o que compromete a atividade de Rubisco, Sacarose-fosfato-sintase e ADP-glicose pirofosforilase, o que limita a carboxilação, síntese e transporte de carboidratos. Além do mais, PSI/PSII acabam por sofrer desorganização estrutural, pois a fotossíntese é inibida por restrições difusivas (g_m) e bioquímicas (V_{cmax}/J_{max}), e o transporte de carboidratos pode ser interrompido, explicando a redução de crescimento e produtividade (Meng et al., 2023; Zhou et al., 2024).

A exposição das plantas a herbicidas pode provocar uma série de respostas fisiológicas e bioquímicas, incluindo a produção de espécies de EROs, peroxidação lipídica e danos às membranas celulares (Oliveira, 2024). Mg, como foi visto anteriormente atua como um cofator essencial em diversas enzimas, e é um elemento primordial na mitigação desses efeitos adversos. Estudos demonstraram que a deficiência de magnésio aumenta a suscetibilidade das plantas ao estresse induzido por herbicidas, danificando processos vitais como fotossíntese e síntese de proteínas. Nesse caminho, a suplementação adequada do macronutriente trabalhado, melhora a resistência das plantas

ao estresse, promovendo a estabilidade das membranas celulares, a ativação de enzimas antioxidantes e a manutenção da integridade funcional de ribossomos e ácidos nucleicos (Meng et al., 2023). Estando envolvido também na regulação da homeostase iônica, essencial para a adaptação das plantas a condições adversas induzidas por herbicidas (Oliveira, 2024).

A entrada desbalanceada de fertilizantes em áreas agrícolas também pode favorecer a redução de Mg nos solos (Chen et al., 2017). Nesse caso, a fertilização das culturas geralmente se concentrou apenas na aplicação de nitrogênio (N), fósforo (P) e K. Essa fertilização desbalanceada, comum em sistemas agrícolas modernos, tem contribuído para a deficiência de Mg nas culturas nas últimas décadas (Cakmak; Yazici, 2010). Desta maneira, alguns estudos têm demonstrado a melhor eficiência da nutrição de Mg para plantas de forma foliar (Channab et al. 2024; Kalocsai et al. 2024; Rodrigues et al. 2021; Silva et al 2017).

O fornecimento de Mg influencia diretamente processos fisiológicos das plantas, e sua eficácia está intimamente ligada à mobilidade do nutriente nos tecidos, à interação com íons antagonistas como cálcio (Ca) e potássio (K), e à capacidade da planta de absorver e redistribuir Mg internamente. A disponibilidade adequada de Mg é essencial não apenas para o crescimento, mas também para a regulação de processos metabólicos e ativação de sistemas antioxidantes, que ajudam a planta a tolerar estresses fisiológicos como seca, altas temperaturas e exposição a herbicidas (Kalocsai et al., 2024).

O Mg desempenha um papel fundamental na partição de carboidratos e na produção de matéria seca entre raízes e parte aérea, na fixação fotossintética de CO₂ e na formação de espécies reativas de oxigênio e danos foto-oxidativos relacionados. Uma quantidade adequada de magnésio é necessária durante o estágio de crescimento reprodutivo para manter o transporte de carboidratos importantes dos órgãos fonte. A eficiência da aplicação foliar de nutrientes como o Mg está diretamente correlacionada com a mobilidade do nutriente dentro da planta (Ahmed et al. 2023). Nitrogênio, K e Mg têm alta mobilidade através do floema e, portanto, suas aplicações foliares seriam benéficas para aumentar a tolerância ao estresse das plantas, enquanto o cálcio e o ferro têm mobilidade relativamente lenta e, portanto, podem ser menos eficazes. Um método alternativo é a aplicação foliar de formas iônicas ou quelatadas de nutrientes (Rodrigues et al. 2021).

A aplicação foliar de magnésio em plantas cultivadas pode melhorar o rendimento em condições de estresse hídrico, o que reduz a absorção de magnésio (Channab et al. 2024; Kalocsai et al. 2024). A aplicação foliar de magnésio resultou em melhoria do crescimento e rendimento de soja e milho cultivado em condições de estresse hídrico (Silva et al 2017). Ahmed et al. (2023) relataram que em folhas deficientes em Mg, a redução no transporte e acumulação de carboidratos ocorre como resultado do metabolismo de carbono fotossintético alterado e da fixação limitada de CO₂. A produtividade e quantidade de óleo de grãos de *Brassica napus* foi maior em plantas com nutrição adequada de Mg mesmo em condições de estresse térmico (Guotao et al 2021). Boaretto et al. (2020) demonstram que uma nutrição adequada de Mg em plantas jovens de limoeiro tem um importante efeito protetor contra a exposição simultânea a altas temperaturas do ar e luz solar.

Embora o grande número de informações a respeito do efeito desses herbicidas, são poucas as informações sobre o resultado quando aplicado sobre a soja Enlist™ E3, também o magnésio como um mitigador desse possível estresse.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização das áreas experimentais

O experimento foi realizado em condições de campo, em três localidades Caarapó-MS, Dourados-MS, Juti-MS com solos distintos. As características químicas do solo foram as seguintes para Caarapó: pH (CaCl₂ 0,01 M) 4,7; fósforo (resina), boro (água quente), cobre (DTPA), ferro (DTPA), manganês (DTPA) e zinco (DTPA): 21,8, 0,42, 5,40, 15,20, 25,25 e 4 mg dm⁻³, respectivamente; potássio (resina), cálcio (resina), magnésio (resina), H + Al (tampão SMP) e capacidade de troca catiônica: 0,43, 3,4, 0,6, 4,43 e 8,86 cmol_c dm⁻³, respectivamente; saturação por bases: 50%. Já as características físicas foram 396 g kg⁻¹ de argila, 396 g kg⁻¹ de silte e 531 g kg⁻¹ de areia.

No experimento em Dourados, as análises resultaram pH (CaCl₂ 0,01 M) 4,7; fósforo (resina), boro (água quente), cobre (DTPA), ferro (DTPA), manganês (DTPA) e zinco (DTPA): 13, 0,47, 14,60, 11,10, 26,40 e 2 mg dm⁻³, respectivamente; potássio (resina), cálcio (resina), magnésio (resina), H + Al (tampão SMP) e capacidade de troca catiônica: 0,16, 5,87, 3,16, 9,19 e 12,44 cmol_c dm⁻³, respectivamente; saturação por bases: 26,1%. Já as características físicas foram 493 g kg⁻¹ de argila, 207 g kg⁻¹ de silte e 300 g kg⁻¹ de areia.

Na área conduzida em Juti, obteve pH (CaCl₂ 0,01 M) 4,7; fósforo (resina), boro (água quente), cobre (DTPA), ferro (DTPA), manganês (DTPA) e zinco (DTPA): 15, 0,25, 0,8, 48,20, 6,25 e 0,8 mg dm⁻³, respectivamente; potássio (resina), cálcio (resina), magnésio (resina), H + Al (tampão SMP) e capacidade de troca catiônica: 0,05, 1,43, 0,43, 1,91 e 2,99 cmol_c dm⁻³, respectivamente; saturação por bases: 14,4%. Já as características físicas foram 109 g kg⁻¹ de argila, 21 g kg⁻¹ de silte e 870 g kg⁻¹ de areia. Essas características foram determinadas conforme descrito por Rajj et al. (2011).

As áreas experimentais estavam localizadas nos municípios de Dourados-MS (chácara Daniele), Caarapó-MS (sítio Nossa Senhora Aparecida) e Juti-MS (Fazenda Soebe), todos no estado de Mato Grosso do Sul (Figura 1). As coordenadas geográficas das áreas foram: 22°17' de latitude sul e 54°49' de longitude oeste (Dourados); 22°44' de latitude sul e 54°52' de longitude oeste (Caarapó); e 22°41' de latitude sul e 54°34' de longitude oeste (Juti).

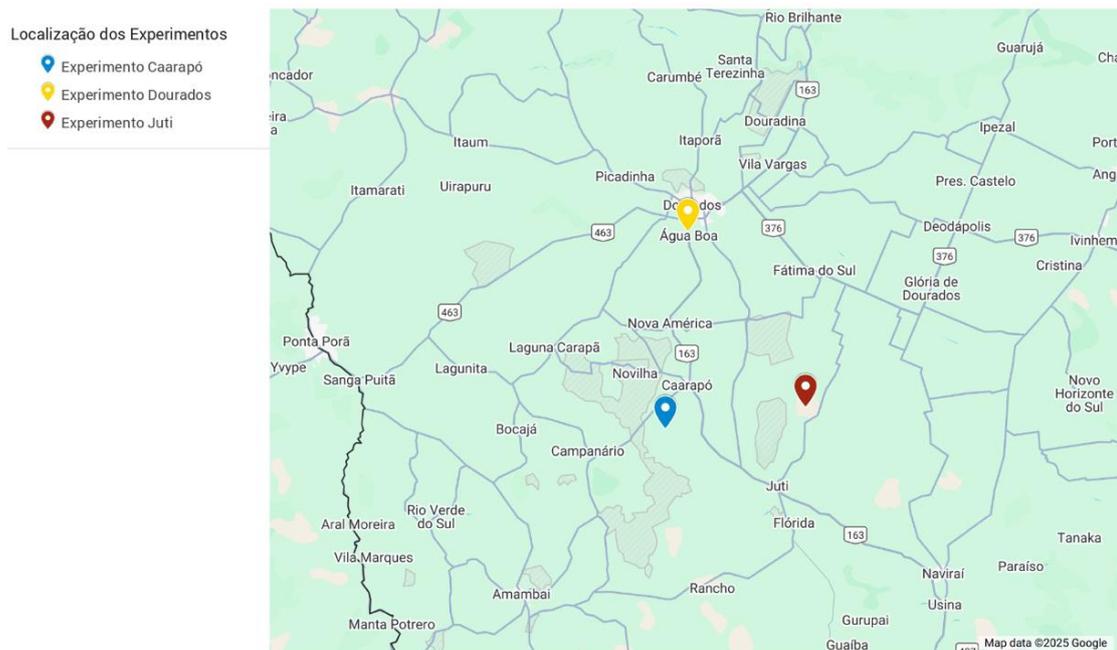


FIGURA 1. Localização dos experimentos no Mato Grosso do Sul nos municípios de Caarapó (Azul), Dourados (amarelo) e Juti (Vermelho).

3.2 Condução do experimento

Os experimentos foram conduzidos em campo durante a safra 2024/2025, em áreas semeadas com soja Enlist™ E3, da cultivar Brasmax Fúria Conkesta Enlist™ E3, durante a condução do experimento foram coletados os dados climáticos diários, de temperatura média (°C), umidade relativa do ar (%) e precipitação (mm) por meio da plataforma NASA POWER Data Access Viewer (NASA, 2025). O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial 5×5 , sendo cinco doses de magnésio (0, 50, 100, 150 e 200 g ha⁻¹), tendo como fonte o sulfato de magnésio, e cinco tratamentos de herbicidas: sem capina; glyphosate (1.500 g e.a. ha⁻¹); 2,4-D sal colina (1.000 g e.a. ha⁻¹); glufosinato (500 g e.a. ha⁻¹) e capina). A aplicação de doses elevadas de glifosato (1.500 g e.a. ha⁻¹), 2,4-D sal colina (1.000 g e.a. ha⁻¹) e glufosinato de amônio (500 g e.a. ha⁻¹) em soja Enlist™ E3 é justificada por estudos que demonstram que essas concentrações podem induzir estresse fisiológico, afetando fotossíntese, síntese de proteínas e crescimento, permitindo avaliar respostas bioquímicas da planta (Rosa, 2025).

As unidades experimentais foram constituídas de 100 parcelas com 3×5 metros, totalizando uma área de 0,15 hectares, as unidades experimentais possuíam a área útil de 2×3 metros onde para as avaliações retiramos a bordadura para evitarmos interferência dos tratamentos das unidades ao lado. As características à instalação dos experimentos.

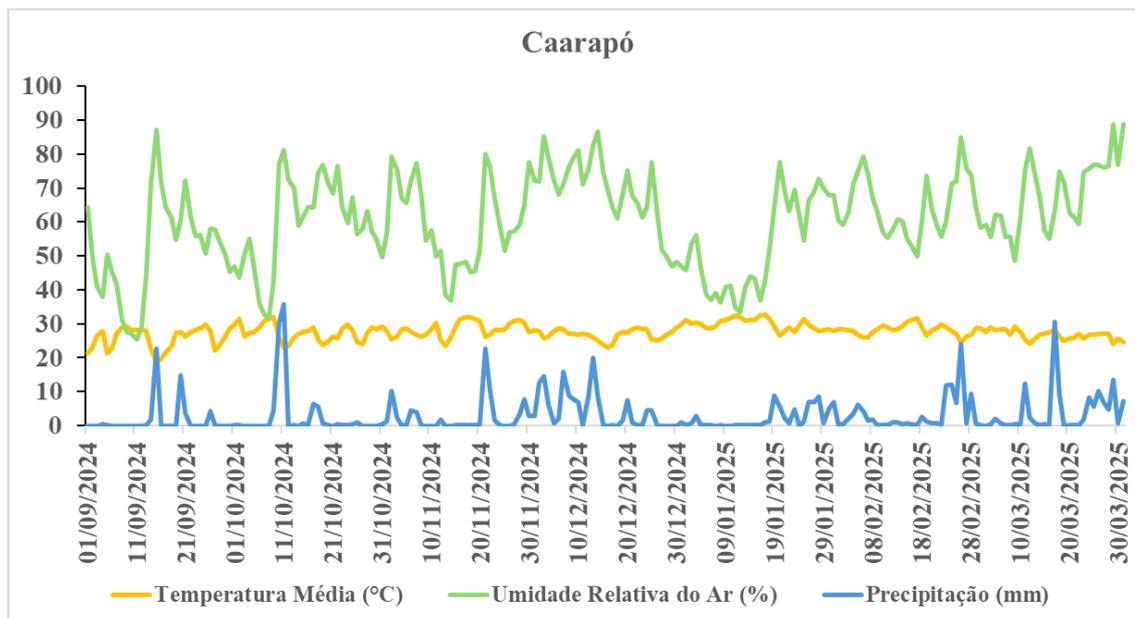


FIGURA 2. Dados de temperatura média (°C), umidade relativa do ar (%) e precipitação (mm), durante a condução do experimento no Mato Grosso do Sul no município de Caarapó de setembro de 2024 a março de 2025.

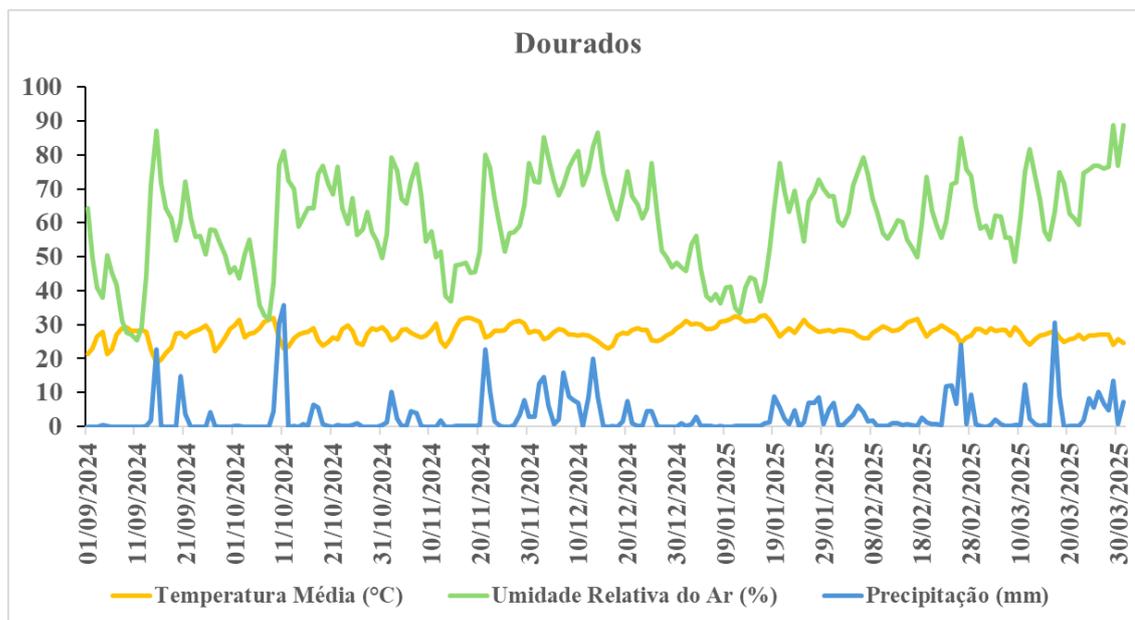


FIGURA 3. Dados de temperatura média (°C), umidade relativa do ar (%) e precipitação (mm), durante a condução do experimento no Mato Grosso do Sul no município de Dourados de setembro de 2024 a março de 2025.

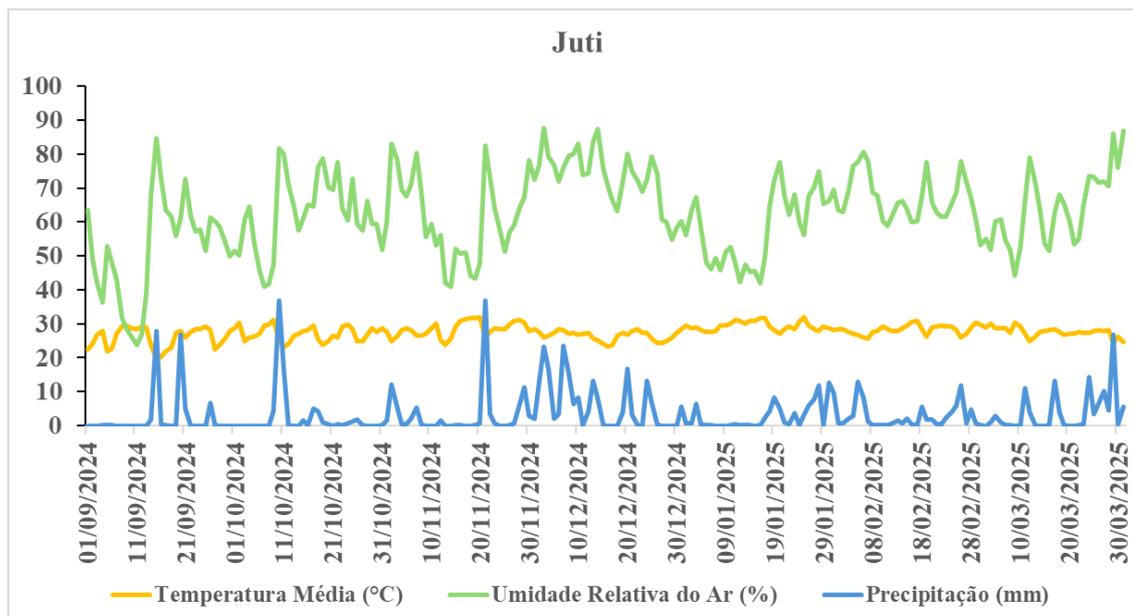


FIGURA 4. Dados de temperatura média (°C), umidade relativa do ar (%) e precipitação (mm), durante a condução do experimento no Mato Grosso do Sul no município de Juti de setembro de 2024 a março de 2025.

As aplicações foliares de magnésio foram realizadas no estágio fenológico V4, critério baseado nas descobertas de Altarugio et al. (2017), que confirmam que o Mg aplicado em V4, como também nos estádios reprodutivos R1 e R5.1, elevou significativamente o índice SPAD e incrementou a produtividade da soja, com ganho médio de 325 kg ha⁻¹, exibindo a eficácia da aplicação no início do desenvolvimento vegetativo. As aplicações dos herbicidas pós-emergentes descrito na Tabela 1, foram realizadas após o estágio fenológico V4 da soja, 14 dias após a aplicação do Mg, estratégia apoiada pelo período crítico para controle de plantas daninhas (CWFP), que compreende os estádios V2 a R1 (Knezevic et al., 2019)

TABELA 1. Tratamentos de herbicidas e doses de Mg em pós emergência

Nº	Mg (g.ha ⁻¹)	Aplicação Herbicida	Dose (g e.a. ha ⁻¹)
T1	0	Sem capina	-
T2	50	Sem capina	-
T3	100	Sem capina	-
T4	150	Sem capina	-
T5	200	Sem capina	-
T6	0	Glyphosate	1500
T7	50	Glyphosate	1500
T8	100	Glyphosate	1500
T9	150	Glyphosate	1500
T10	200	Glyphosate	1500

...continua...

T11	0	2,4-D Sal Colina	1000
T12	50	2,4-D Sal Colina	1000
T13	100	2,4-D Sal Colina	1000
T14	150	2,4-D Sal Colina	1000
T15	200	2,4-D Sal Colina	1000
T16	0	Glufosinato	500
T17	50	Glufosinato	500
T18	100	Glufosinato	500
T19	150	Glufosinato	500
T20	200	Glufosinato	500
T21	0	Capina	-
T22	50	Capina	-
T23	100	Capina	-
T24	150	Capina	-
T25	200	Capina	-

Os herbicidas e doses de Mg foram aplicados com pulverizador costal pressurizado com CO₂, provido de barra de pulverização contendo seis bicos tipo leque Teejet 110.02, espaçados a 0,5 m, o qual cobriu uma faixa de 3 m, com volume de aplicação de 150 L ha⁻¹. As condições climáticas, no momento das aplicações, foram mensuradas utilizando termo anemômetro apresentadas na Tabela 2. As condições de aplicação foram com vento entre 3 e 8 km/h, temperatura (< 30°C) e umidade relativa do ar (> 55%), realizadas pelas manhãs.

TABELA 2. Condições climáticas nos momentos de aplicações das doses de magnésio e herbicidas

Aplicação	Caarapó		Dourados		Juti	
	Doses de Magnésio	Herbicidas	Doses de Magnésio	Herbicidas	Doses de Magnésio	Herbicidas
Vento (km/h)	3,2	8	8	3,7	5	4
Umidade relativa do ar (%)	66,6	69,5	56,4	82,1	56	58
Temperatura (°C)	28,3	29	30	30	30	24,5

3.3 Avaliação da fitotoxicidade de herbicidas

Foram realizadas avaliações de fitotoxicidade na cultura da soja, utilizando-se a escala de notas de fitotoxicidade proposta pela European Weed Research Council (1964), a qual correlaciona a porcentagem de danos visuais com a caracterização do sintoma de fitotoxicidade dos herbicidas glyphosate (Figura 5), 2,4-D Sal de colina (Figura 6) e glufosinato de amônio (Figura 7), onde 0% está relacionado com a ausência de dano e

80–100% significa destruição total das plantas (morte da planta), aos 42 dias após a aplicação dos tratamentos herbicidas (DAT).



FIGURA 5. Folhas de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) com sintomas de fitotoxicidade causados pela aplicação do herbicida glyphosate, observadas a campo.



FIGURA 6. Folhas de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) com sintomas de fitotoxicidade causados pela aplicação do herbicida 2,4-D Sal de colina, observadas a campo.



FIGURA 7. Folhas de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) com sintomas de fitotoxicidade causados pela aplicação do herbicida glufosinato de amônio, observadas a campo.

3.4 Análise nutricional do tecido vegetal

Na última avaliação aos 42 DAT foram coletadas folhas completamente desenvolvidas (folhas diagnósticas), para a análise do tecido vegetal seco, as concentrações de magnésio (Mg), foram determinadas por extrato via digestão nítrico-perclórica e espectrometria de absorção atômica (Malavolta, 1997).

3.5 Avaliação de produtividade

A dessecação em pré-colheita da cultura da soja foi realizada quando as plantas estavam no estágio fenológico R7.3, com a aplicação do herbicida diquat (400 g i.a. ha⁻¹). No sexto dia após a aplicação do dessecante, quando as plantas apresentavam mais de 95% de senescência foliar, foi realizada a colheita, seguindo a metodologia proposta por Alencar et al. (2023). Foram colhidas quatro linhas centrais da área útil das parcelas, descartando-se 1 m das extremidades das bordaduras. A colheita foi feita de forma manual e, na sequência, as plantas foram trilhadas com o auxílio de uma trilhadeira a diesel (SB IMPLEMENTOS), separando-se os fragmentos vegetais dos grãos de soja. O peso total dos grãos foi verificado com o auxílio de uma balança e, em seguida, com um medidor

portátil de umidade de grãos modelo AL-102 ECOR (Agrologic, Curitiba, PR, Brasil), foram retiradas amostras, as quais foram levadas ao laboratório para a separação e contagem de mil grãos com o auxílio de um contador eletrônico modelo Automatic Seed Counter.

3.6 Parâmetros de trocas gasosas

As avaliações foram realizadas no 3º e 4º trifólios a partir da ponta dos ramos produtivos, no terço médio da planta. As avaliações de trocas gasosas consistiram em análises não destrutivas, sendo determinada a taxa fotossintética (A), a condutância estomática (g_s), a transpiração (E). As avaliações foram realizadas no período da manhã, entre as 7:00 e 12:00 horas. Foi utilizado um analisador portátil de gás por infravermelho (Infrared Gas Analyzer – IRGA, LCIPro – SD ADC BioScientific Ltd.).

3.7 Determinação de Açúcares Totais e Sacarose nas Folhas.

A quantificação da sacarose foi realizada segundo o método de van Handel, 1968. Nesse procedimento, foram adicionados 20 μ L da porção hidrofílica do extrato MCW, 500 μ L de KOH a 30% e 2 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) a um tubo de vidro. A mistura foi agitada em vórtice e aquecida a 100°C por 10 minutos. Após resfriamento à temperatura ambiente, a absorbância foi medida a 490 nm utilizando um espectrofotômetro (SP-220, Bioespectro™, São Paulo, Brasil). O teor de sacarose foi expresso em $mg\ g^{-1}$ de massa seca (MS). A quantificação dos açúcares totais seguiu o protocolo descrito por DuBois et al. 1956. Nesse procedimento, 20 μ L da porção hidrofílica do extrato MCW, 500 μ L de fenol a 5% e 2 mL de H_2SO_4 concentrado foram combinados em um tubo de vidro. Após agitação em vórtice, a mistura foi resfriada à temperatura ambiente e a absorbância foi medida a 490 nm no espectrofotômetro (SP-220, Bioespectro™). Os resultados foram expressos em $mg\ g^{-1}$ de massa seca (DW). Uma curva padrão de sacarose foi utilizada para quantificar tanto a sacarose quanto os açúcares totais.

3.8 Pigmentos fotossintéticos

A concentração de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total, carotenoides, foi avaliada em espectrofotômetro, de acordo com Lichtenthaler (1987). As amostras utilizadas nessa análise foram folhas completamente desenvolvidas (folhas diagnósticas) coletadas frescas em solução tampão acetona ao final das avaliações.

3.9 Compostos de nitrogênio

A extração de compostos nitrogenados das folhas coletadas aos 50 dias após a semeadura foi realizada de acordo com Silva et al. (2023), incluindo uma solução MCW (composta de 60% de metanol, 25% de clorofórmio e 15% de água). O teor de ureídeos (alantoína e ácido alantóico) foi determinado nas folhas (500 mg) pelo método de Vogels e Van Der Drift (1970). Esse método envolve um ensaio colorimétrico em que a alantoína e o ácido alantóico reagem com reagentes específicos para produzir uma mudança de cor mensurável, que é quantificada por meio de espectrofotometria. Essa reação baseia-se no princípio de que os ureídeos podem ser hidrolisados e detectados por meio de sua interação com determinados produtos químicos, resultando em um complexo colorido.

3.10 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância e de regressão. Para o fator qualitativo, as médias foram comparadas, utilizando o teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para o fator quantitativo, os modelos foram escolhidos baseados na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste t , no coeficiente de determinação (r^2) e no fenômeno biológico. Independentemente da interação ser ou não significativa, optou-se pelo desdobramento da mesma.

4. RESULTADOS

A avaliação de fitotoxicidade realizada aos 42 dias após os tratamentos (DAT) descrita na Tabela 3, indicou que os sintomas observados foram, em geral, de baixa intensidade, não ultrapassando 1,25% em nenhum dos experimentos conduzidos. Nos tratamentos sem capina e com capina manual, independentemente da dose de magnésio aplicada, não foram registrados sintomas visíveis de injúria nas plantas de soja, evidenciando a ausência de efeitos negativos do magnésio foliar isoladamente.

Para o herbicida glyphosate, observaram-se pequenas injúrias apenas na área de Dourados, com valores variando entre 0,5% e 0,75%, enquanto em Caarapó e Juti não houve fitotoxicidade praticamente apenas com um valor (0,5%) em Caarapó, confirmando a boa seletividade da biotecnologia Enlist™ E3 a este produto.

O herbicida 2,4-D sal colina apresentou sintomas levemente superior, com destaque para a ausência de magnésio em Caarapó (1,25), enquanto em Juti não foram detectados sintomas.

O glufosinato foi o herbicida que resultou nos maiores valores médios de fitotoxicidade, ainda que discretos, alcançando 1,25% em Juti, além de variações de até 1% em Dourados.

De modo geral, os resultados demonstram que a fitotoxicidade observada foi mínima, reforçando a alta tolerância da soja Enlist™ E3 aos herbicidas testados, sem evidências de que a aplicação de magnésio foliar tenha intensificado os sintomas, podendo inclusive ter contribuído para atenuar pequenas injúrias em alguns casos.

TABELA 3. Média das avaliações de fitotoxicidade aos 42 DAT nos experimentos

Aplicação Herbicida	Doses de Mg (mg ha ⁻¹)	Caarapó	Dourados	Juti
Sem capina	0	0%	0%	0%
	50	0%	0%	0%
	100	0%	0%	0%
	150	0%	0%	0%
	200	0%	0%	0%
Glyphosate	0	0%	0%	0%
	50	0%	0,75%	0%
	100	0%	0,5%	0%
	150	0,5%	0,5%	0%
	200	0%	0,75%	0%

...continua...

	0	1,25%	0,25%	0%
	50	0%	0,5%	0%
2,4-D Sal Colina	100	0%	1%	0%
	150	0%	1,25%	0%
	200	0%	0%	0%
	0	0%	0,75%	0%
	50	0%	1%	0%
Glufosinato	100	0%	0,25%	0%
	150	0,5%	0,5%	1,25%
	200	0,5%	0,25%	0%
	0	0%	0%	0%
	50	0%	0%	0%
Capina	100	0%	0%	0%
	150	0%	0%	0%
	200	0%	0%	0%

A concentração de Mg nas folhas da soja enlist aumentaram em resposta as doses de Mg, observando-se as maiores concentrações Mg nas maiores doses utilizadas, nas três regiões (Figura 5). Observou-se um comportamento crescente, evidenciando que o fornecimento exógeno do nutriente refletiu diretamente no aumento de sua absorção e acúmulo nas folhas da cultura. A dose mais elevada resultou na maior concentração foliar observada, indicando que, até esse nível, a planta continuava a responder positivamente à suplementação, o que demonstra ausência de efeito de saturação no intervalo testado.

A concentração foliar de magnésio (Mg) na soja Enlist™ E3 apresentou resposta linear crescente em função das doses aplicadas via foliar em todas as localidades avaliadas (Caarapó, Dourados e Juti), com coeficientes de determinação elevados (r^2 variando de 0,94 a 0,96), indicando forte correlação entre dose e absorção foliar (Figura 5). Não foi observada saturação do nutriente, mesmo nas doses mais altas, evidenciando que o fornecimento exógeno de Mg refletiu diretamente no acúmulo foliar. As concentrações obtidas em doses equivalentes foram consistentes entre os três municípios, demonstrando uniformidade na resposta da soja ao Mg. Além disso, os diferentes herbicidas testados (Glifosato, 2,4-D Sal de Colina e Glufosinato) não afetaram significativamente a absorção do nutriente. Dessa forma, a aplicação foliar de Mg promoveu aumento linear de seu conteúdo nas folhas, com maior acúmulo nas doses mais elevadas, independentemente da localidade ou do herbicida utilizado.

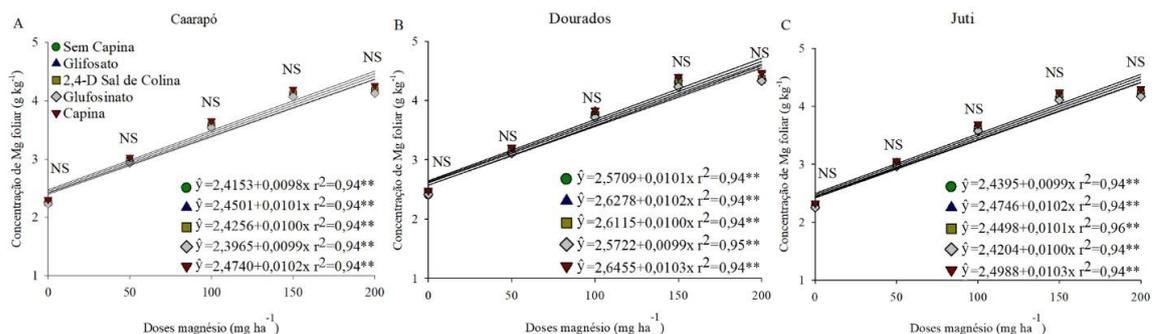


FIGURA 8. Valores médio de concentração de magnésio nas folhas de soja (g kg^{-1}) submetidas as doses de 0, 50, 100, 150 e 200 mg ha^{-1} de magnésio associadas aos herbicidas (sem capina, glyphosate, 2,4-D sal colina, glufosinato e capina). nos experimentos em Caarapó-MS (A), Dourados-MS (B) e Juti-MS (C).

NS= não significativo pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)

O tratamento que combinou a capina com as doses apresentou as maiores médias de produtividade seguida pela aplicação de glyphosate, e em todas as localidades e tratamentos com a combinação de sem capina apresentou os menores valores independente da dose de Mg (Figura 6). Os tratamentos com os herbicidas 2,4-D sal colina e glufosinato apresentarem produtividades muito semelhantes independentemente da localidade e da dose de Mg aplicada (Figura 6). Em todos os casos a produtividade inicial (0 mg ha^{-1}) já está superior nos demais tratamentos comparados a testemunha com sem capina, e quanto maior a dose maior foi a diferença de produtividade dos outros tratamentos comparados a esse. Esse contraste foi ampliado com o aumento das doses de magnésio, reforçando a importância da adubação foliar na mitigação da competição com plantas daninhas e na promoção do desempenho produtivo. Em Dourados (Figura 6B e 6E), apresentou os valores absolutos mais altos de produtividade em todos os tratamentos. Entre os municípios as médias de produtividade dos experimentos foram semelhantes, Caarapó ($37,9 \text{ sc ha}^{-1}$), Dourados ($38,4 \text{ sc ha}^{-1}$) e Juti ($38,3 \text{ sc ha}^{-1}$). Esses achados evidenciam que, embora existam diferenças sutis entre localidades, o efeito positivo da adubação foliar de magnésio foi consistente em todas as áreas avaliadas.

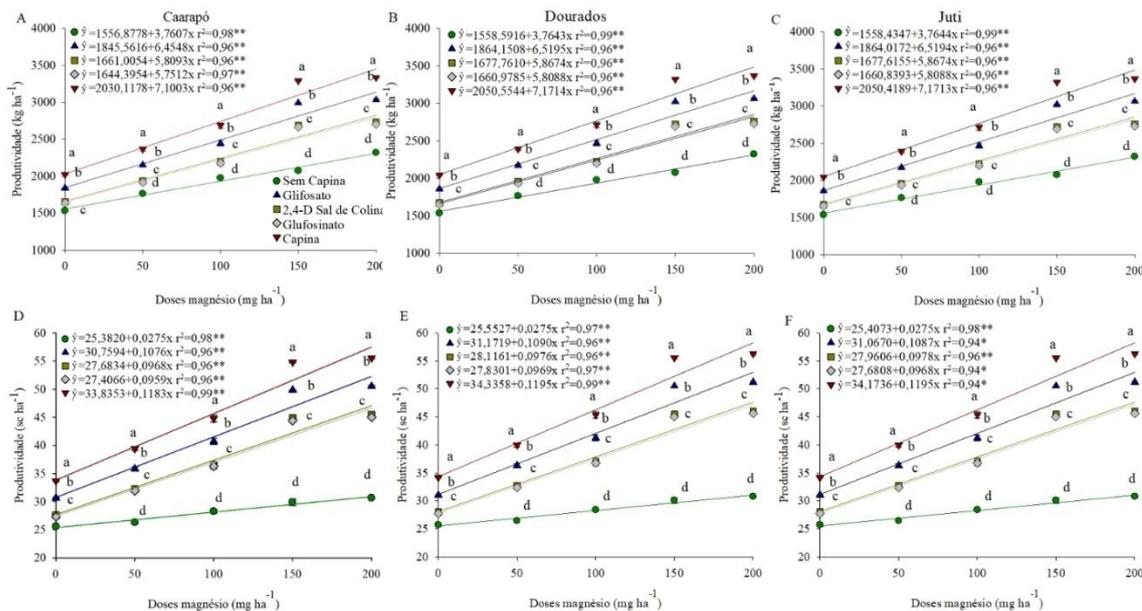


FIGURA 9. Valores médio de produtividade de soja em kg ha⁻¹ submetidas as doses de 0, 50, 100, 150 e 200 mg ha⁻¹ de magnésio associadas aos herbicidas (sem capina, glyphosate, 2,4-D sal colina, glufosinato e capina). nos experimentos em Caarapó-MS (A), Dourados-MS (B) e Juti-MS (C) e em t ha⁻¹ em Caarapó-MS (D), Dourados-MS (E) e Juti-MS (F).

Letras diferentes indicam diferença entre o manejo de plantas daninhas dentro de cada dose de magnésio foliar estudada.

A taxa fotossintética (A) da soja Enlist™ E3 apresentou aumento positivo em resposta às doses foliares de magnésio (Mg) em todos os tratamentos, exceto no tratamento sem capina, que manteve valores consistentemente mais baixos e estáveis em relação aos demais (Figura 7A, 7B e 7C). Os tratamentos com herbicidas (Glifosato, 2,4-D Sal de Colina, Glufosinato) e a capina promoveram taxas fotossintéticas superiores em todas as localidades avaliadas (Caarapó, Dourados e Juti), com diferenças mínimas entre si. Essa resposta indica que a aplicação foliar de Mg favoreceu a fotossíntese da soja, enquanto a presença de mato competição limitou o desempenho fotossintético independentemente da dose aplicada.

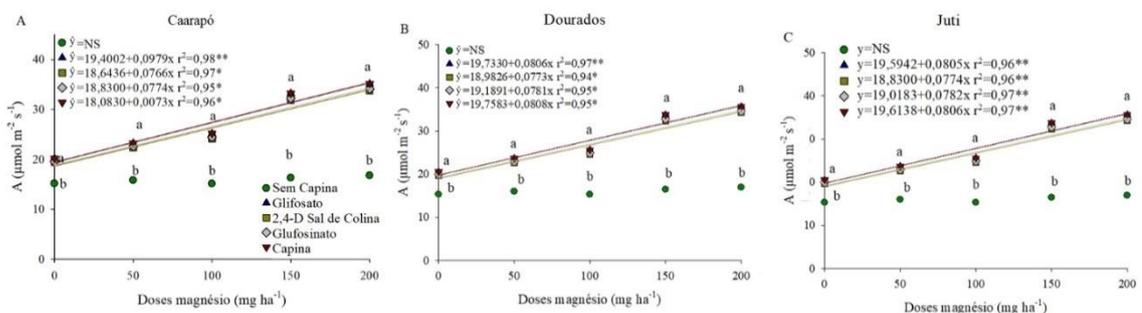


FIGURA 10. Valores médio de taxa fotossintética ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) submetidas as doses de 0, 50, 100, 150 e 200 mg ha⁻¹ de magnésio associadas aos herbicidas (sem capina, glyphosate, 2,4-D sal colina, glufosinato e capina). nos experimentos em Caarapó-MS (A), Dourados-MS (B) e Juti-MS (C).

Letras diferentes indicam diferença entre o manejo de plantas daninhas dentro de cada dose de magnésio foliar estudada.

A transpiração (E) e a condutância estomática (G_s) apresentaram incremento linear em função do aumento das doses de magnésio (Mg) em todas as localidades avaliadas (Caarapó, Dourados e Juti), independentemente do herbicida utilizado. Observa-se que os tratamentos com herbicidas (Glifosato, 2,4-D Sal de Colina, Glufosinato e Capina) não diferiram significativamente entre si, todos se mantendo acima do tratamento sem capina, o qual permaneceu estável e em níveis inferiores (Figura 8). Esse comportamento é consistente entre as localidades, evidenciando que a suplementação de Mg contribui positivamente para o aumento da transpiração e da condutância estomática.

De forma semelhante ao observado para a taxa fotossintética, a transpiração e a condutância estomática tiveram um aumento paralelo com o incremento das doses de Mg para todos os tratamentos, destacando-se novamente a condição sem capina como menos responsiva. Assim, em todas as localidades, o padrão de resposta às doses de Mg mostrou-se consistente e reprodutível.

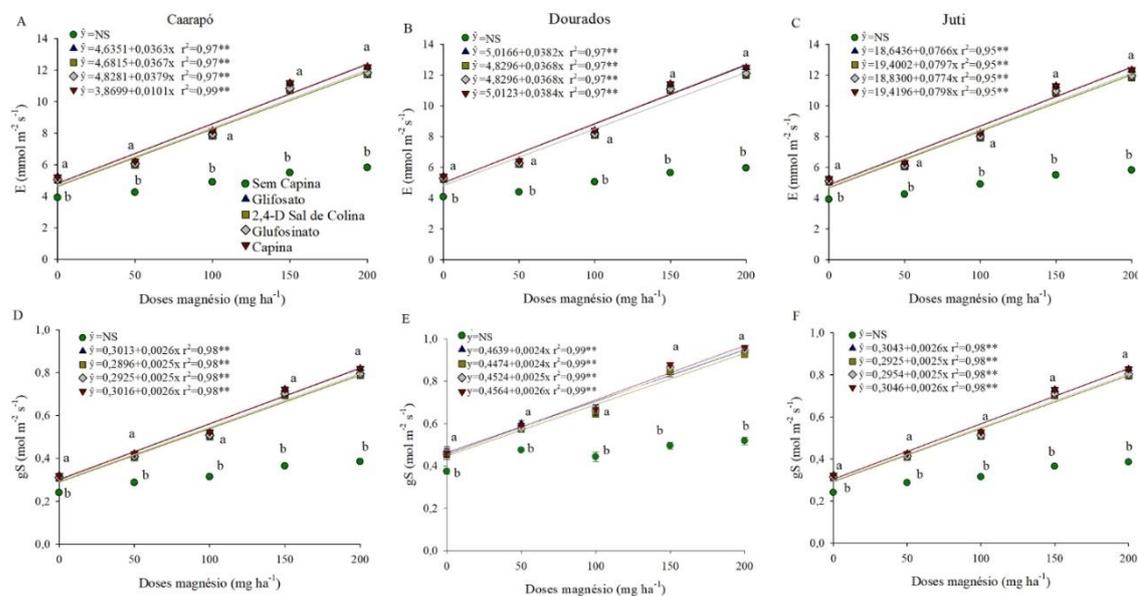


FIGURA 11. Valores médio de transpiração ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) submetidas as doses de 0, 50, 100, 150 e 200 mg ha^{-1} de magnésio associadas aos herbicidas (sem capina, glyphosate, 2,4-D sal colina, glufosinato e capina). nos experimentos em Caarapó-MS (A), Dourados-MS (B) e Juti-MS (C), e condutância estomática ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em Caarapó-MS (D), Dourados-MS (E) e Juti-MS (F), ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em Caarapó-MS (G), Dourados-MS (H) e Juti-MS (I) e eficiência do uso da água ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em Caarapó-MS (J), Dourados-MS (K) e Juti-MS (L). Letras diferentes indicam diferença entre o manejo de plantas daninhas dentro de cada dose de magnésio foliar estudada.

Os parâmetros teor de sacarose e açúcar total foram elevados com o aumento das doses de Mg, com ressalva para o tratamento sem capina, que permaneceu em níveis mais baixos e estáveis, não apresentando incremento significativo com a adubação, em todas as localidades avaliadas. Por outro lado, os tratamentos com capina, glyphosate, 2,4-D sal de colina e glufosinato mostraram comportamento estatisticamente semelhante em todas as doses, respondendo de forma significativa e positiva ao aumento de Mg (Figura 9).

De forma consistente entre as localidades (Caarapó, Dourados e Juti), observa-se que o magnésio contribuiu para incrementos lineares tanto no teor de sacarose (Figuras 9A, 9B e 9C) quanto no açúcar total (Figuras 9D, 9E e 9F). Esses resultados reforçam que a presença de Mg desempenha papel fundamental na melhoria da qualidade tecnológica, refletindo em maior acúmulo de sacarose e açúcar, enquanto a ausência de capina compromete o aproveitamento do nutriente e limita o desempenho produtivo da cultura.

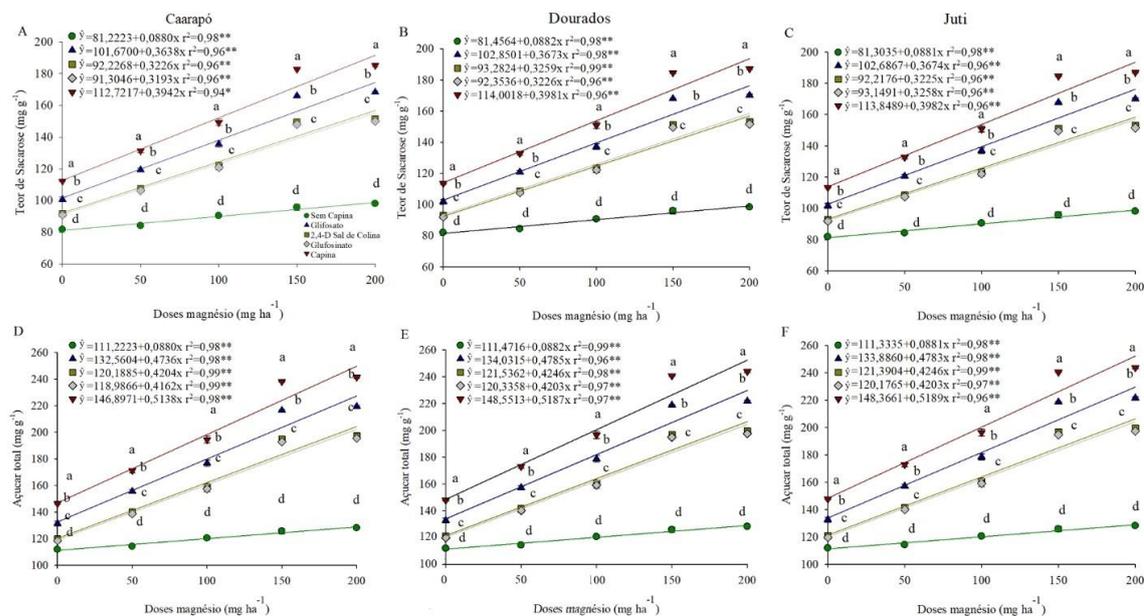


FIGURA 12. Valores médio de teor de sacarose (mg g⁻¹) submetidas as doses de 0, 50, 100, 150 e 200 mg ha⁻¹ de magnésio associadas aos herbicidas (sem capina, glyphosate, 2,4-D sal colina, glufosinato e capina). nos experimentos em Caarapó-MS (A), Dourados-MS (B) e Juti-MS (C), Açúcar total (mg g⁻¹) em Caarapó-MS (D), Dourados-MS (E) e Juti-MS (F). Letras diferentes indicam diferença entre o manejo de plantas daninhas dentro de cada dose de magnésio foliar estudada.

Para a clorofila *a* e *b*, notamos aumento significativo conforme a elevação das doses de Mg, com ressalva para o tratamento sem capina, que permaneceu em níveis inferiores e não respondeu ao incremento do nutriente, sendo considerado não significativo. Já os demais tratamentos com herbicidas e capina apresentaram aumento

expressivo e sem diferença estatística entre si (Figura 10A, 10B e 10C). Em todas as localidades, a capina e os herbicidas foram superiores à condição sem capina.

De maneira consistente em Caarapó, Dourados e Juti, observa-se que tanto a clorofila *a* (Figuras 10A, 10B e 10C) quanto a clorofila *b* (Figuras 10D, 10E e 10F) responderam linearmente ao aumento das doses de Mg, indicando que o nutriente contribuiu de forma significativa para o acúmulo de pigmentos fotossintéticos. Esse comportamento reforça o papel essencial do magnésio na estrutura da molécula de clorofila e no favorecimento da capacidade fotossintética da planta.

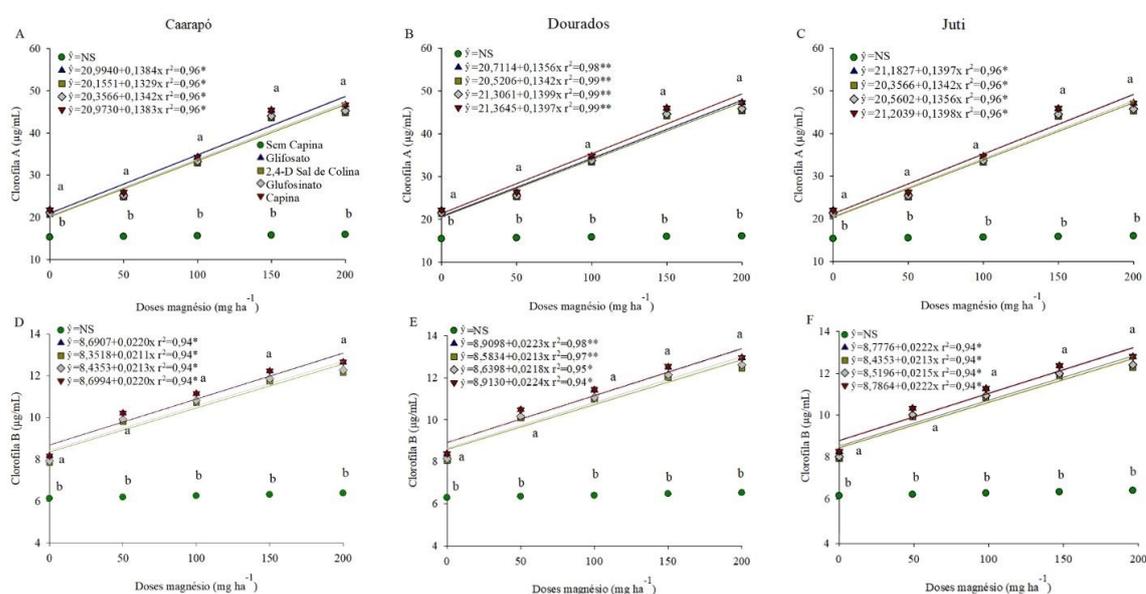


FIGURA 13. Valores médio de clorofila *a* ($\mu\text{g mL}^{-1}$) submetidas as doses de 0, 50, 100, 150 e 200 mg ha^{-1} de magnésio associadas aos herbicidas (sem capina, glyphosate, 2,4-D sal colina, glufosinato e capina). nos experimentos em Caarapó-MS (A), Dourados-MS (B) e Juti-MS (C), Clorofila *b* ($\mu\text{g mL}^{-1}$) em Caarapó-MS (D), Dourados-MS (E) e Juti-MS (F). Letras diferentes indicam diferença entre o manejo de plantas daninhas dentro de cada dose de magnésio foliar estudada.

Para os carotenoides e a clorofila total, observou-se aumento significativo conforme a elevação das doses de Mg, com ressalva para o tratamento sem capina, que permaneceu em níveis mais baixos e não respondeu ao incremento do nutriente, sendo considerado não significativo. Já os demais tratamentos com herbicidas e capina apresentaram aumento expressivo, sem diferença estatística entre si (Figura 11A, 11B e 11C). Em todas as localidades, a capina e os herbicidas foram superiores ao sem capina.

De forma consistente em Caarapó, Dourados e Juti, tanto os carotenoides (Figuras 11A, 11B e 11C) quanto a clorofila total (Figuras 11D, 11E e 11F) apresentaram incremento linear em resposta ao aumento das doses de Mg, confirmando o papel central do nutriente na síntese de pigmentos fotossintéticos. Esse padrão de resposta demonstra

que o magnésio contribui diretamente para a melhoria do aparato fotossintético, refletindo em maior eficiência no aproveitamento da radiação luminosa.

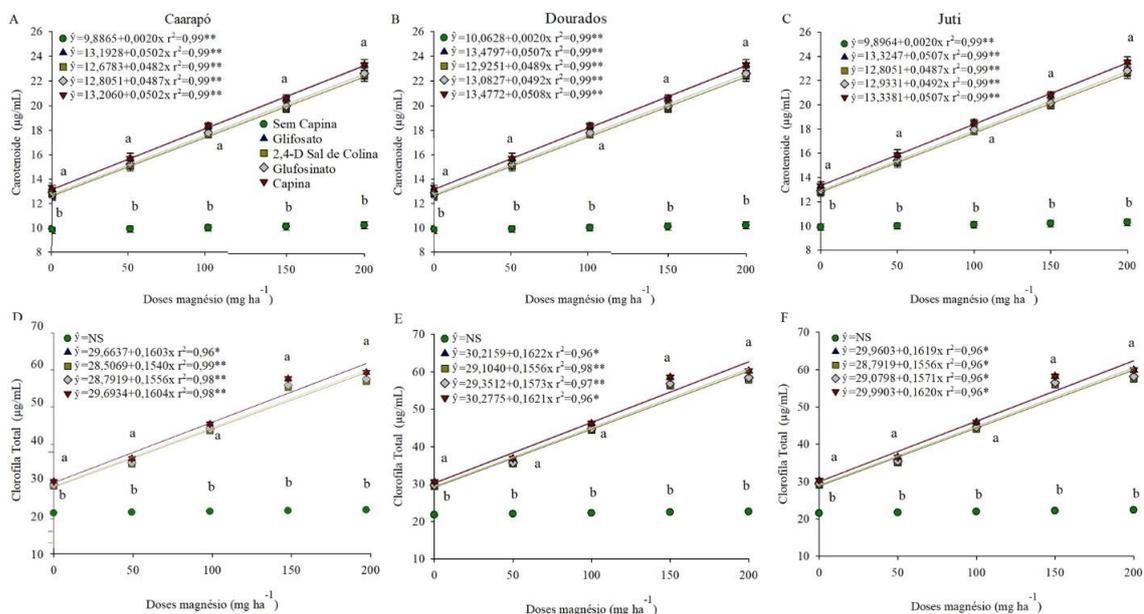


FIGURA 14. Valores médio de Carotenóide ($\mu\text{g mL}^{-1}$) submetidas as doses de 0, 50, 100, 150 e 200 mg ha^{-1} de magnésio associadas aos herbicidas (sem capina, glyphosate, 2,4-D sal colina, glufosinato e capina). nos experimentos em Caapó-MS (A), Dourados-MS (B) e Juti-MS (C), e Clorofila Total ($\mu\text{g mL}^{-1}$) em Caapó-MS (D), Dourados-MS (E) e Juti-MS (F). Letras diferentes indicam diferença entre o manejo de plantas daninhas dentro de cada dose de magnésio foliar estudada.

A alantóina (Figuras 12A, 12B e 12C), teve o aumento com a elevação das doses de Mg, isso novamente ressalva ao tratamento sem capina, qual esteve mais abaixo em níveis e não significativo com o aumento das doses do nutriente, já os demais herbicidas e capina com um aumento expressivo e todos eles iguais estatisticamente. Isso ocorreu em todas as localidades. Observamos um comportamento semelhante para o ácido alantóico (Figuras 12D, 12E e 12F), para o ureídeo total (Figuras 12G, 12H e 12I). A resposta das doses de Mg e dos tratamentos herbicidas foram consistentes independente da localidade.

A alantóina (Figuras 12A 12B e 12C) apresentou aumento significativo com a elevação das doses de Mg, ressalvando-se o tratamento sem capina, que permaneceu em níveis mais baixos e não respondeu ao incremento do nutriente, sendo considerado não significativo. Os demais tratamentos, incluindo capina, glyphosate, 2,4-D sal de colina e glufosinato, mostraram incremento expressivo e comportamento estatisticamente semelhante entre si. Esse padrão foi consistente em todas as localidades avaliadas.

Comportamento semelhante foi observado para o ácido alantóico (Figuras 12D, 12E e 12F), em que o aumento das doses de Mg promoveu acréscimos lineares nos níveis do metabólito para todos os tratamentos, exceto o sem capina, que permaneceu em patamar inferior e estável. Da mesma forma, o ureídeo total (Figuras 12G, 12H e 12I) apresentou resposta linear positiva ao aumento de Mg nos tratamentos com capina e herbicidas, enquanto o tratamento sem capina manteve-se em níveis reduzidos e sem diferença significativa ao longo das doses.

Assim, a resposta das doses de Mg e dos tratamentos herbicidas para alantoína, ácido alantóico e ureídeo total foi consistente, independentemente da localidade, evidenciando que a adubação com Mg exerce papel central no metabolismo nitrogenado da cultura.

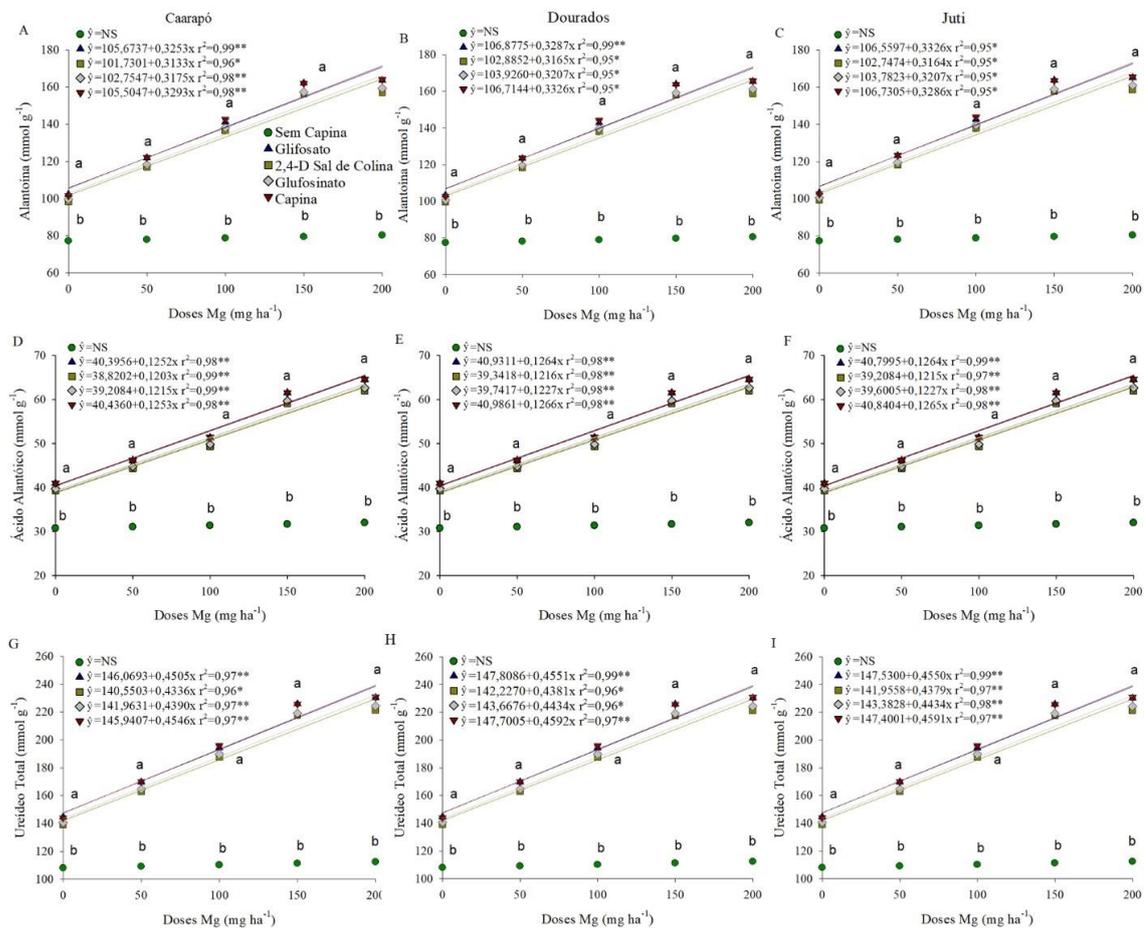


FIGURA 15. Valores médio de alantoína (mmol g^{-1}) submetidas as doses de 0, 50, 100, 150 e 200 mg ha^{-1} de magnésio associadas aos herbicidas (sem capina, glyphosate, 2,4-D sal colina, glufosinato e capina) nos experimentos em Caarapó-MS (A), Dourados-MS (B) e Juti-MS (C), ácido alantóico (mmol g^{-1}) em Caarapó-MS (D), Dourados-MS (E) e Juti-MS (F), e ureídeo total (mmol g^{-1}) em Caarapó-MS (G), Dourados-MS (H) e Juti-MS (I).

Letras diferentes indicam diferença entre o manejo de plantas daninhas dentro de cada dose de magnésio foliar estudada.

5. DISCUSSÃO

Esse estudo inédito, apresentou, de forma geral, que a aplicação foliar de Mg promoveu efeitos positivos e consistentes na soja Enlist™ E3, elevando a concentração foliar do nutriente, a taxa fotossintética, transpiração, condutância estomática, pigmentos fotossintéticos (clorofila a, b, total e carotenoides), açúcares (sacarose e açúcar total) e compostos nitrogenados (alantoína, ácido alantóico e ureídeos totais). Esses ganhos refletiram em maior produtividade de grãos, sendo mais expressivos nos tratamentos com herbicidas e capina, enquanto o tratamento sem capina manteve-se em níveis inferiores e estáveis. Os resultados foram lineares e consistentes entre as localidades, sem efeitos negativos de estresse fisiológico, confirmando a importância estratégica do magnésio no desempenho fisiológico, bioquímico e produtivo da cultura.

Os resultados do estudo indicam um efeito positivo na concentração do teor do magnésio nas plantas, a partir do aumento das doses desse macronutriente na aplicação foliar, o que reflete diretamente no desenvolvimento e na produtividade. A suplementação foliar do Mg, juntamente com a absorção eficiente, atua na fotossíntese e na proteção contra o estresse oxidativo, contribuindo para a saúde e vigor das plantas, provocando melhorias de grande relevância no metabolismo fotossintético e antioxidante da cultura. O aumento das doses de magnésio promoveu maior acúmulo foliar do nutriente, indicando absorção eficiente via aplicação foliar, refletindo diretamente no metabolismo e na produtividade da soja. (Rodrigues et al., 2021).

Em complemento, a fertilização foliar com magnésio resulta no aumento da qualidade e do rendimento do grão, levando ao aumento dos teores minerais nas folhas e melhorando os processos metabólicos. Além disso, estudos prévios demonstram que a melhoria nutricional por meio de aplicação foliar, pode influenciar de modo positivo os teores de nutrientes, especialmente do magnésio, evidenciando ainda mais a eficácia dessa prática para aumentar a concentração do mineral mesmo em diferentes condições de campo e espécies cultivadas (Boldrin et al., 2023; Santos et al., 2025).

O desenvolvimento reprodutivo e o crescimento das plantas podem ser restringidos e prejudicados pela deficiência de Mg, ou seja, a disponibilidade de magnésio está diretamente relacionada ao aumento da produtividade da soja. Sendo o átomo central da molécula de clorofila, o Mg exerce um papel fundamental na fotossíntese, atuando como cofator enzimático e potencializando assim o metabolismo fotossintético de

carbono. É possível encontrar estudos que demonstram que a aplicação foliar desse nutriente estimula a eficiência da Rubisco e da PEP carboxilase, o que otimiza a absorção gás carbônico e o transporte de produtos da fotossíntese para os órgãos reprodutivos, resultando em um enchimento de grão superior e um maior rendimento final. Somando a isso, o Mg contribui para o equilíbrio nutricional e tolerância a estresses ambientais, o que pode manter a integridade fisiológica da planta em condições adversas. (Rodrigues et al., 2021; Ahmed et al., 2023; Bai et al., 2024).

As avaliações realizadas referentes à taxa fotossintética líquida, condutância estomática, transpiração e eficiência do uso da água trazem ao estudo importantes respostas fisiológicas da soja à fertilização foliar com magnésio. Em estudo encontrado essa aplicação foliar desses nutrientes promoveu aumento significativo na taxa fotossintética líquida, resultado atribuído à maior atividade da enzima Rubisco, que é essencial para a fixação de carbono durante a fotossíntese, o que contribui diretamente para o aumento do potencial produtivo da cultura. A suplementação com Mg elevou significativamente a taxa fotossintética líquida e a condutância estomática, reduzindo a concentração interna de CO₂ e a transpiração em condições de saturação luminosa, com aumento concomitante da eficiência no uso da água e eficiência de carboxilação. (Rodrigues et al., 2021)

Os estudos demonstraram que a condutância estomática apresentou elevação após a fertilização, o que pode indicar uma maior abertura e melhorar a troca gasosa, no entanto, a transpiração não aumentou de forma proporcional, o que sugere um possível um ajuste na regulação estomática permitindo à planta manter o equilíbrio hídrico e minimizar perdas excessivas de água. E isso é refletido no aumento da eficiência do uso da água, o que é fundamental para a adaptação da soja a condições de disponibilidade hídrica limitada. Porém a transpiração aumentou conforme a dose também era aumentada, diminuindo assim a eficiência do uso da água. (Rodrigues, 2021; Bărdăș et al., 2023).

A aplicação foliar de magnésio desempenha papel essencial no metabolismo dos carboidratos, principalmente na síntese e transporte de sacarose, principal açúcar transportado nas plantas, “podemos afirmar uma resposta significativa às aplicações foliares com uso de macronutrientes para melhorar a eficiência na sinalização de sacarose da folha para a vagem repercutindo em massa de grãos” (Moraes, et al, 2021, p.28).

Os resultados encontrados durante as análises deste estudo sustentam a importância da aplicação foliar de magnésio para melhorar o metabolismo dos açúcares,

especialmente a sacarose, em soja. Complementando esse entendimento, Rodrigues (2021) relata que o magnésio é cofator essencial para diversas enzimas envolvidas no metabolismo da fotossíntese e na síntese de açúcares, além de atuar na estabilidade dos complexos proteicos do fotossistema. A aplicação foliar de magnésio tem efeito direto na elevação dos níveis de sacarose, isto é, existe um rendimento maior dos grãos, em razão ao aumento da concentração total de açúcar devido a assimilação líquida de Rubisco na soja.

As clorofilas e carotenoides, conhecidos como pigmentos fotossintéticos, são essenciais para o desenvolvimento das plantas. Neste estudo, as doses crescentes de magnésio levaram ao aumento na síntese de clorofilas, reforçando o papel fundamental desse nutriente na fotossíntese e no metabolismo vegetal. Em concordância, Maciel et al. (2024) observaram que, no momento do florescimento, os acúmulos de nutrientes foram influenciados tanto pelas doses quanto pela adubação foliar de Mg, apresentando um efeito significativo no índice de clorofila foliar. Esse aumento no teor de pigmentos está diretamente relacionado à maior eficiência na captura de luz e na produção de energia química, aspectos cruciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas.

Além disso, para Júnior (2025), a aplicação de Mg também resultou em um aumento considerável nas taxas fotossintéticas e no teor de clorofila, o que ocasionou um crescimento no número de vagens e grãos, refletindo em maior produtividade da cultura. Tais evidências comprovam a importância da adequada nutrição com magnésio para maximizar o rendimento das plantas, especialmente em fases críticas como o florescimento e o enchimento de grãos (Cakmak; Yazici, 2010).

Além disso, a aplicação aquedada de magnésio irá fortalecer algumas atividades enzimáticas fundamentais no metabolismo do nitrogênio da planta, alguns exemplos são: nitrogênase, nitrato redutase, nitrito redutase, glutamina sintase e GOGAT, o que é comprovado em estudos que resulta em maior síntese de ureídeos, contribuindo para a nodulação.

O presente estudo é inovador por reunir respostas fisiológicas, bioquímicas e produtivas da soja Enlist™ E3 à aplicação foliar de magnésio em diferentes condições de cultivo. Além de confirmar o papel central do Mg na fotossíntese e no metabolismo do carbono e nitrogênio, evidencia seu potencial como estratégia prática de manejo para elevar a eficiência fisiológica e a produtividade, mesmo em associação com herbicidas.

Esses resultados reforçam o magnésio como nutriente estratégico para a agricultura moderna, unindo relevância científica e aplicabilidade no campo.

Portanto, a aplicação foliar de magnésio apresenta-se como uma alternativa agronômica eficiente, de baixo custo e elevado potencial de retorno produtivo, além de ser uma estratégia prática e acessível ao manejo agrícola. Os resultados obtidos neste estudo reforçam a relevância da adoção dessa prática e abrem espaço para novas pesquisas que aprofundem seus mecanismos fisiológicos, ampliem seu uso em diferentes culturas e ambientes de produção, e fortaleçam o desenvolvimento tecnológico voltado à sustentabilidade, estabilidade e segurança da produção agrícola.

6. CONCLUSÃO

Com base no exposto, percebe-se que a aplicação foliar de magnésio é uma estratégia agrônômica eficiente para atenuar os efeitos fisiológicos adversos decorrentes da aplicação dos herbicidas glyphosate, 2,4-D sal de colina e glufosinato na soja Enlist™ E3. A hipótese de que o magnésio poderia atenuar estresses induzidos pelos herbicidas foi confirmada, uma vez que a suplementação promoveu incremento significativo nos teores foliares do nutriente, melhor desempenho fotossintético, maior acúmulo de açúcares solúveis e pigmentos fotossintéticos, além da redução de sintomas de fitotoxicidade, nos tratamentos com aplicação foliar de magnésio. Esses efeitos refletiram em ganhos consistentes de produtividade, evidenciando o papel central do magnésio na manutenção da integridade celular, no equilíbrio do metabolismo do carbono, e do nitrogênio e na modulação da resposta antioxidante da planta.

Em síntese, os resultados indicam que o fornecimento de magnésio via foliar representa uma prática viável e de alta relevância fisiológica e produtiva, reforçando sua importância no manejo nutricional integrado da cultura da soja Enlist™ E3, principalmente em sistemas agrícolas que demandam eficiência no uso de insumos, estabilidade produtiva e mitigação de estresses fisiológicos induzidos por herbicidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED N, et al. The power of magnesium: unlocking the potential for increased yield, quality, and stress tolerance of horticultural crops. **Front Plant Sci.** 2023.

ALENCAR, E. R., et al. Qualidade dos grãos de soja armazenados em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, (2023), 13(5), 606-613. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000500014>

ALTARUGIO, L. M. et al. Yield performance of soybean and corn subjected to magnesium foliar spray. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 52, n. 12, p. 1185–1191, 2017. DOI: 10.1590/S0100-204X2017001200007.

BAI, R, et al. Effects of foliar application of magnesium fertilizer on photosynthesis and growth in grapes. **Agronomy**, [S.l.], v. 14, n. 11, p. 2659, 2024.

BĂRDĂȘ, M., et al. The Impact of Foliar Fertilization on the Physiological Parameters, Yield, and Quality Indices of the Soybean Crop. **Agronomy**, v. 13, n. 5, art. 1287, 2023. DOI: 10.3390/agronomy13051287.

BENEVENUTO, R. F. et al. Proteomic profile of glyphosate-resistant soybean under combined herbicide and drought stress conditions. *Plants*, Basel, v. 10, n. 11, p. 2381, 2021.

BROETTO, F. Métodos de trabalho em bioquímica vegetal e tecnologia de enzimas. Botucatu. 2014.

BOARETTO R. M. Et al. The possible role of extra magnesium and nitrogen supply to alleviate stress caused by high irradiation and temperature in lemon trees. **Plant Soil**, 2020.

BOLDRIN, P. F., et al. Potassium and magnesium foliar fertilization increase quality and soybean grain yield. **DELÓS: Desarrollo Local Sostenible**, Curitiba, v. 16, n. 45, p. 1543-1556, ago. 2023.

CAKMAK, I.; YAZICI, A. M. Magnesium: A forgotten element in crop production. **Better Crops With Plant Food**, 94:23-25, 2010.

COETZER, E.; AL-KHATIB, K. Photosynthetic inhibition and ammonium accumulation in response to glufosinate in glufosinate-resistant and -susceptible corn (*Zea mays*) and soybean (*Glycine max*). **Weed Science**, v. 49, p. 458–466, 2001.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos – safra 2024/25: 2º levantamento. Brasília, DF: Conab, 2024a.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de grãos – safra 2023/24: 12º levantamento. Brasília, DF: Conab, 2024b.

CORTEVA AGRISCIENCE et al. Enlist E3® Soybeans. Enlist™ weed control system. [s.l.], [s.d.]. 2025

CHANNAB, B. E., IDRISSE, A. E., AMMAR, A., DARDARI, O., MARRANE, S. E., EL GHARRAK, A., ... & ZAHOUILY, M. Recent advances in nano-fertilizers: synthesis, crop yield impact, and economic analysis. **Nanoscale**, 2024.

CHEN Q, et al. Phosphorylation and Interaction with the 14-3-3 Protein of the Plasma Membrane H⁺-ATPase are Involved in the Regulation of Magnesium-Mediated Increases in Aluminum-Induced Citrate Exudation in Broad Bean (*Vicia faba*. L). **Plant Cell Physiol.** 2015 Jun;56(6):1144-53. doi: 10.1093/pcp/pcv038. Epub 2015 Mar 5. PMID: 25745032.

CHEN, J.; et al. Magnesium fertilizer-induced increase of symbiotic microorganisms improves forage growth and quality. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 65:3253-3258, 2017.

DEMICHELI, N. H. Efecto de la fertilización foliar con potasio y magnesio sobre el rendimiento y calidad de la soja. *Revista DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, v. 16, n. 48, p. 1–14, 2023. Acesso em: 20 ago. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Dados econômicos – soja. Portal Embrapa Soja.

EUROPEAN WEED RESEARCH COUNCIL-EWRC. Methods in weed research. **Weed Research**, Oxford, v. 4, p. 88, 1964.

FAST, B. J; GALAN, M. P; SCHAFER, A. C. Event DAS-44406-6 soybean grown in Brazil is compositionally equivalent to non-transgenic soybean. **GM Crops & Food**, v. 7, n. 2, p. 79–83, 2016. <https://doi.org/10.1080/21645698.2016.1184815>

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxidedismutases: occurrence in higherplants. **Plant Physiology**, 59: 309-314, 1977.

GUOTAO G; et al. Effect of magnesium fertilization on seed yield, seed quality, carbon assimilation and nutrient uptake of rapeseed plants, **Field Crops Research**, 264, 2021.

GUO, W.; NAZIM, H.; LIANG, Z.; YANG, D. Magnesium deficiency in plants: An urgent realistic problem. *The Crop Journal*, v. 3, n. 2, p. 83–88, 2015.

HEATH, R.L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, 125: 189-198, 1968.

Heap I. The international herbicide-resistant weed database. **Weedscience**. 2024.

Heap I.; Duke, S. O. Overview of glyphosate-resistant weeds worldwide. **Pest Management Science**, Hoboken, v. 74, n. 5, p. 1040–1049, 2018.

HERMANS, C.; VERBRUGGEN, N. Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. **Plant and Soil**, v. 368, p. 87-99, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1589-0>. Acesso em: 20 ago. 2025.

HERMANS, C.; et al. Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. **Plant and Soil**, v. 368, p. 1–4, 2013.

(IBGE) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo agropecuário 2017: resultados definitivos; **IBGE**: Rio de Janeiro, RJ./Brazil.

ISHFAQ, M. et al. Physiological essence of magnesium in plants and its widespread deficiency in the farming system of China. *Frontiers in Plant Science, Sec. Plant Nutrition*, v. 13, 24 abr. 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.802274.

KALOCSAI, R., GICZI, Z., SZAKÁL, T., CENTERI, C., BIRÓ, Z., VONA, M., ... & VONA, V. Effect of pH, Carbonate and Clay Content on Magnesium Measurement Methods on Hungarian Soils. **Soil Systems**, 8(2), 49, 2024.

KRAUS, T.E., EVANS, R.C., FLETCHER, R.A., PAULS, K.P. Paclobutrazol enhances tolerances to increased levels of UV-B radiation in soybean (*Glycine max*) seedlings. **Canadian Journal Botany**, 73:797-806, 1995.

KNEZEVIC, S. Z. et al. Critical time for weed removal in glyphosate-resistant soybean as influenced by preemergence herbicides. **Weed Technology**, v. 33, p. 99–107, 2019.

Li J. et al. *Magnesium application improves the morphology, nutrients uptake, photosynthetic traits, and quality of tobacco (Nicotiana tabacum L.) under cold stress.* **Frontiers in Plant Science**. 2023;14:1078128. DOI: 10.3389/fpls.2023.1078128.

MACIEL, I. C. Doses de magnésio via solo com ou sem adubação foliar complementar com magnésio na cultura da soja. 2024. 35 f.: il. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2024.

MARSCHNER, P. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3. ed. London: Academic Press, 2012.

MATSUNO, H.; URATANI, I. Physiological behavior of peroxidase isozymes in sweet potato root tissue injured by cutting or with black root. **Plant and Cell Physiology**, 13: 1091-1101, 1972.

MENG, X. et al. The sensitivity of photosynthesis to magnesium deficiency differs between rice (*Oryza sativa* L.) and cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Frontiers in Plant Science*, v. 14, p. 1164866, 2023. Acesso em: 24 ago. 2025.

MONTEIRO, M. S. et al. Controle de *Conyza* spp. e seletividade do 2,4-D em soja Enlist®. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 28, n. 2, p. 145–151, 2024.

MORAES, G. C., et al. Aplicação foliar de potássio, fósforo e magnésio na fase reprodutiva da cultura de soja. **Revista Cerrado Agrociências**, Patos de Minas, v. 12, p. 19-35, 2021.

MORAES, I. C., et al. Effects of glyphosate on the morphology and cell cycle of soybean seedlings tolerant and sensitive to the herbicide. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 59, e03432, 2024.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, 22: 867-880, 1981.

NASA. POWER Data Access Viewer. National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, Hampton, VA, 2025.

OLIVEIRA, T. S. Produtividade e respostas antioxidantes da soja enlist E3TM submetida à aplicação de herbicidas. 2019.

OLIVEIRA, C. da S. Et al. Dinâmica do magnésio no sistema solo-planta e sua participação no metabolismo e nutrição de plantas: uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, [S. l.], v. 17, n. 4, 2024. DOI: 10.36560/17420241898.

OLIVEIRA, L.C.A. Papel fisiológico do magnésio na fotossíntese, atividade da Rubisco e Fixação Biológica de Nitrogênio em genótipos de soja. 2024. 145f. (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, São Paulo, 2024.

RASBAND, W. (2011) ImageJ documentation. Disponível em: <<https://imagej.nih.gov/ij/docs/index.html>>.

RODRIGUES B. N.; ALMEIDA F. S. **Guia de herbicidas**. 7ª edição. Londrina: Midiograf, 2018.

RODRIGUES, V. A., et al. Magnesium foliar supplementation increases grain yield of soybean and maize by improving photosynthetic carbon metabolism and antioxidant metabolism. **Plants, Basel**, v. 10, n. 4, p. 797, 19 abr. 2021. DOI: 10.3390/plants10040797.

RODRIGUES, V. A. Nitrogen and magnesium foliar fertilization in soybean and maize. 2021. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Agricultura) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2021.

ROSA, Pablo Henrique Alves. Aplicação de 2,4-D sal colina, glufosinato de amônio e glifosato em diferentes doses em uma cultivar de soja com a biotecnologia Enlist E3®. 2025.

SANTOS, E. F., et al. Selenium agronomic biofortification and genotypic variability in physiological responses of cowpea plants under field conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 47, art. 18, 2025.

SANTOS, J. B. et al. Efeito de formulações na absorção e translocação do ¹⁴C-glyphosate por plantas de soja (variedade CD 219RR). *Planta Daninha*, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 383–389, 2007.

SILVA, A. A.; FERREIRA, F. A.; FERREIRA, L. R.; SANTOS, J. B. Herbicidas: classificação e mecanismo de ação. In: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. (Org.). *Tópicos em manejo de plantas daninhas*. Viçosa, MG: UFV, 2020. p. 83-148.

SILVA, A. F.; FERREIRA, E. A.; SANTOS, J. B. et al. Fitotoxicidade de herbicidas em cultivares de soja com diferentes tecnologias. *Revista Brasileira de Herbicidas*, v. 19, n. 1, p. 1-11, 2020.

SILVA, D. M. Et al. The effect of magnesium nutrition on the antioxidant response of coffee seedlings under heat stress. *Scientia Horticulturae*, 224:115-125, 2017.

SILVA, F. S; et al. CmyoSize: An ImageJ macro for automated analysis of cardiomyocyte size in images of routine histology staining. *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger*. V. 241, e.151892, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2022.151892>

SILVA, J. N.; COSTA, E. M.; ALMEIDA, D. P.; PEREIRA, L. S.; VENTURA, M. V. A.; BALIZA, L. M.; JAKELAITIS, A. Bioestimulante e fertilizante foliar na redução de injúrias em plantas de soja causadas pelo 2,4-D. *Revista Brasileira de Herbicidas*, v. 19, n. 1, p. 1–8, jan./mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.7824/rbh.v19i1.690>. Acesso em: 26 ago. 2025.

SILVA V. M. Et al. Does Selenium Application Increase the Yield of Cowpea Plants? Evidence from 29 Genotypes on Ureides and Sugar Index Affecting the Yield. *J Soil Sci Plant Nutr.* (2023). <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01448-4>

SILVÉRIO, J. M. et al. Gas exchange and antioxidant metabolism of seedlings of *Cedrela fissilis* Vell. under varying water and light availability. *Flora*, [S.l.], v. 300, p. 153350, jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.153350>.

SOUZA JÚNIOR, N. C. de; Produtividade da soja em função da presença ou ausência de magnésio foliar e rizobactérias promotoras de crescimento para mitigação do estresse térmico em condições de campo. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônoma) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2025. Orientador: Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho. Coorientador: Guilherme Carlos Fernandes.

TAKANO, H. K.; BEFFA, R.; PRESTON, C.; WESTRA, P.; DAYAN, F. E. Physiological factors affecting uptake and translocation of glufosinate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 68, n. 10, p. 3026–3032, 2020.

TAIZ, L. et al. *Fisiologia vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. ISBN: 978-85-363-1774-2.

TAVANTI, Tauan Rimoldi. Papéis fisiológicos do magnésio no metabolismo de ureídeos de plantas de soja cultivadas no cerrado de alta altitude. 2021. Tese (Doutorado em

Engenharia Agrônômica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/9548e23c-86f4-4abe-b2e7-630f30931276>.

VIAN, A. L., & TIECHER, T. Magnésio: um macronutriente importante. **Boletim Agrônômico**. UFRGS. 2023.

VOGELS, G. D., VAN DER DRIFT C. (1970) Differential analyses of glyoxylate derivatives. **Anal Biochem** 33:143–157. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(70\)90448-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(70)90448-3)

ZHOU, Haimei et al. Leaf diffusional capacity largely contributes to the reduced photosynthesis in rice plants under magnesium deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 209, p. 108565, abr. 2024. DOI: 10.1016/j.plaphy.2024.108565. Acesso em: 24 ago. 2025.