

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**RESPOSTA DA CULTURA DA SOJA AO EFEITO RESIDUAL
DO BORO NO ÍNDICE DE CLOROFILA, ÍNDICE DE TOLERÂNCIA
E PRODUTIVIDADE**

Leonardo Davi Issa

**Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado
Coorientadores: Eng. Agr. Angel Camurça Da Silva e
Eng. Agr. João Victor Da Silva Santos**

JABOTICABAL-SP

2025

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**RESPOSTA DA CULTURA DA SOJA AO EFEITO RESIDUAL
DO BORO NO ÍNDICE DE CLOROFILA, ÍNDICE DE TOLERÂNCIA
E PRODUTIVIDADE**

Leonardo Davi Issa

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado
Coorientadores: Eng. Agr. Angel Camurça Da Silva e
Eng. Agr. João Victor Da Silva Santos

Trabalho apresentado à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP,
Câmpus de Jaboticabal, para graduação
em ENGENHARIA AGRONÔMICA.

JABOTICABAL-SP

2ºSemestre/2025

186r

Issa, Leonardo Davi

Resposta da cultura da soja ao efeito residual do boro no índice de clorofila, índice de tolerância e produtividade/ Leonardo Davi Issa. -- Jaboticabal, 2025

28 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Renato de Mello Prado

Coorientadores: Angel Camurça da Silva e João Victor da Silva Santos

1. Soja. 2. Micronutriente. 3. Estresse vegetal. 4. Nutrição mineral. 5. Manejo de adubação I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus Jaboticabal



NOME COMPLETO DO AUTOR: Leonardo Davi Issa

TÍTULO DO TRABALHO ACADÊMICO: Resposta da cultura da soja ao efeito residual do boro no índice de clorofila, índice de tolerância e produtividade

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: Angel Camurça da Silva e João Victor da Silva Santos

Área de Concentração: Nutrição de Plantas

Data da defesa: 10/07/2025

(X) Aprovado

() Reprovado

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

RENATO DE MELLO PRADO

Data: 29/09/2025 11:41:12 -0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Renato de Mello Prado

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal



Documento assinado digitalmente

DOUGLAS HENRIQUE BANDEIRA

Data: 30/09/2025 08:02:11 -0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Douglas Henrique Bandeira

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal



Documento assinado digitalmente

EDILAINÉ ISTEFAINI FRANKLIN TRASPADINI

Data: 30/09/2025 13:03:38 -0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dra. Edilaine Istéfani Franklin Traspadini

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em:

01 / 10 / 25

Aprovado Ad Referendum do Conselho do Departamento

Prof. Dr. José Eduardo Corá

Chefe do Departamento de Ciência do Solo

Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Seção Técnica de Graduação
Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/n CEP 14884-900 Jaboticabal/SP - Brasil
Tel (16) 3209 7106 e-mail: graduacao.fcav@unesp.br - www.fcav.unesp.br

Aos meus pais, pelo exemplo, à minha namorada, por ser porto seguro e impulso ao mesmo tempo, e a mim mesmo, pela coragem de não ter parado no meio do caminho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, saúde e serenidade concedidas ao longo desta caminhada.

Ao Prof. Dr. Renato de Mello Prado, orientador, pela paciência, orientação criteriosa e pelo exemplo de dedicação à ciência. Aos professores e funcionários da FCAV/UNESP, pelo apoio técnico e pela contribuição para minha formação humana e profissional.

Aos colegas e amigos de curso, pela parceria no campo, pelo auxílio nas avaliações e pelo companheirismo que tornou a trajetória acadêmica mais leve e significativa.

Aos meus pais, pelo exemplo de perseverança e por me ensinarem a não desistir, mesmo diante das maiores incertezas. Tudo o que conquistei reflete, antes de tudo, os valores aprendidos em casa.

À minha namorada, pela presença constante em todos os momentos, pelo amor incondicional, pelas palavras de incentivo e pelo apoio nos dias mais difíceis. Sua confiança em meu potencial foi fundamental para que este trabalho fosse concluído com verdade e dedicação.

RESUMO

O boro (B) é um elemento essencial ao desenvolvimento da soja (*Glycine max* L.), desempenhando funções estruturais e fisiológicas relevantes, mas apresenta estreita faixa entre deficiência e toxicidade. A busca por novas dosagens de aplicação decorre da necessidade de ajustar o manejo desse nutriente para maximizar o desempenho fisiológico e produtivo, evitando prejuízos por toxidez. Este estudo avaliou os efeitos residuais de doses de B (0, 3, 9, 27 e 81 kg ha⁻¹), aplicadas via solo na forma de ulexita, em Latossolo Vermelho eutroférico. Foram determinados o índice de clorofila (IC), o índice de tolerância (IT) e a produtividade. As doses que apresentaram resultados mais próximos aos valores máximos observados promoveram incremento do IC (13 kg ha⁻¹) e da produtividade (12 kg ha⁻¹). O IT atingiu 98% na dose de 10 kg ha⁻¹. Conclui-se que as doses ótimas de B podem melhorar a eficiência fisiológica e produtiva da soja, desde que o manejo seja criterioso para evitar perdas por toxidez.

Palavras-chave: soja; micronutriente; estresse vegetal; nutrição mineral; manejo de adubação.

ABSTRACT

Boron (B) is an essential element for the development of soybean (*Glycine max* L.), performing relevant structural and physiological functions, but it presents a narrow range between deficiency and toxicity. The search for new application rates stems from the need to adjust the management of this nutrient to maximize physiological and productive performance, avoiding losses due to toxicity. This study evaluated the residual effects of B rates (0.3, 9.27, and 81 kg ha⁻¹), applied via soil in the form of ulexite, in a eutroferric Red Latosol. The chlorophyll index (CI), tolerance index (TI), and yield were determined. The rates that presented results closest to the maximum observed values promoted an increase in CI (13 kg ha⁻¹) and yield (12 kg ha⁻¹). The TI reached 98% at the 10 kg ha⁻¹ rate. It is concluded that optimal doses of B can improve the physiological and productive efficiency of soybeans, as long as management is judicious to avoid losses due to toxicity.

Keywords: soybean; micronutrient; plant stress; mineral nutrition; fertilization management.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	8
2.REVISÃO DE LITERATURA.....	9
2.1 Importância da soja.....	9
2.2 Importância do boro.....	10
2.3 Toxicidade de boro	11
2.4 Fontes de aplicação de boro	12
2.5 Efeito residual do boro	13
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Arranjo experimental	14
3.2 Análises físico-químicas e preparo do solo	14
3.3 Distribuição pluviométrica	15
3.4 Tratamentos e aplicação das doses	16
3.5 Índice de tolerância.....	17
3.7 Produtividade.....	17
3.8 Análise de dados	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
5.CONCLUSÃO	24
REFERÊNCIAS	24

1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* L.) é uma das culturas mais relevantes da agricultura brasileira, com destaque expressivo na produção mundial. Desde a safra 2019/2020, o Brasil ocupa a liderança global na produção, resultado de avanços tecnológicos, expansão da fronteira agrícola e uso de cultivares adaptadas a diferentes condições edafoclimáticas (USDA, 2025; CONAB, 2025). Na safra 2024/2025, a produtividade média nacional ultrapassou 4.000 kg ha⁻¹, com produção estimada em 167,9 milhões de toneladas, consolidando a cultura como pilar do agronegócio brasileiro.

O aumento da produtividade da soja decorre, em grande parte, do uso de práticas de manejo nutricional mais eficientes. Nesse contexto, o boro (B) desempenha papel fundamental, pois participa de processos estruturais e fisiológicos, incluindo a integridade da membrana plasmática, a síntese da parede celular, o alongamento celular, o transporte de carboidratos e o crescimento reprodutivo (Prado, 2020; Guimarães et al., 2023). Entretanto, a faixa entre deficiência e toxicidade desse micronutriente é estreita, exigindo monitoramento preciso das doses aplicadas.

Em solos brasileiros, especialmente aqueles com baixo teor de matéria orgânica, alta acidez e elevada precipitação, as perdas por lixiviação de boro são comuns, podendo limitar a produtividade e induzir sintomas de deficiência (SÁ; ERNANI, 2016; OLIVEIRA et al., 2007). A fonte de B utilizada influencia diretamente sua disponibilidade. Fontes de alta solubilidade, como o ácido bórico e o bórax, tendem a apresentar maior risco de lixiviação, enquanto fontes de baixa solubilidade, como a ulexita, liberam o nutriente de forma gradual, favorecendo sua permanência no solo (BYERS et al., 2001; DEGRYSE, 2017).

O conceito de “efeito residual” refere-se à capacidade de uma aplicação única de nutriente manter-se disponível e efetiva ao longo de ciclos de cultivo subsequentes, reduzindo a necessidade de reaplicações. No caso do boro, compreender esse efeito é essencial para estabelecer estratégias de adubação mais sustentáveis e economicamente viáveis, sobretudo em sistemas de rotação de culturas.

Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito residual de doses de boro aplicadas via solo, na forma de ulexita, sobre o índice de clorofila, o índice de tolerância e a produtividade da soja, visando identificar faixas de aplicação que maximizem o desempenho fisiológico e produtivo da cultura sem provocar toxidez.

2.REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância da soja

A soja (*Glycine max L.*) é a principal oleaginosa cultivada no Brasil, com registros históricos de produção desde a década de 1940. Naquele período, a produção nacional era de aproximadamente 25 mil toneladas. Já na década de 1950, superou 100 mil toneladas, e, na década de 1960, consolidou-se como uma das principais culturas economicamente ativas do país (HIRAKURI et al., 2021).

A partir da década de 1980, a expansão para o bioma Cerrado marcou um salto produtivo. Essa região passou a responder por cerca de 60% da produção nacional de soja em 2007, multiplicando em quase 75 vezes o volume produzido em relação à década de 1970 (HIRAKURI et al., 2021). O avanço esteve associado à incorporação de tecnologias agrícolas, melhoramento genético e adoção de sistemas de cultivo adaptados às condições edafoclimáticas do Cerrado.

O desenvolvimento de cultivares geneticamente modificadas resistentes a herbicidas foi introduzido de forma experimental no Brasil em 1995, sob regulamentação da Lei de Biossegurança. Com a atualização da legislação em 2005, sua comercialização foi oficialmente permitida, impulsionando a adoção dessa tecnologia e contribuindo para ganhos de produtividade e competitividade (CONAB, 2025).

Além do impacto produtivo, a soja desempenha papel estratégico no abastecimento alimentar e energético. O óleo de soja é amplamente utilizado na alimentação humana e compõe cerca de 10% do biodiesel produzido no país (Conab, 2025). No cenário econômico, o complexo agroindustrial da soja é responsável por aproximadamente 8% das exportações brasileiras, sendo um dos principais geradores de divisas para o agronegócio nacional (HIRAKURI et al., 2021).

A cultura também foi determinante para a modernização da agricultura no Brasil, influenciando a mecanização, a ampliação da fronteira agrícola e a tecnificação de outras culturas, como o milho e o trigo. Dessa forma, a soja consolidou-se não apenas como uma commodity agrícola, mas como vetor de transformação tecnológica e socioeconômica no campo brasileiro.

2.2 Importância do boro

O boro (B) é absorvido majoritariamente por fluxo de massa nas formas H_3BO_3 , H_2BO_3^- e $\text{B}(\text{OH})_4^-$, sendo a maior absorção na primeira forma e transporte unidirecional associado ao fluxo transpiratório (PRADO, 2020). Uma fração do boro é absorvida por difusão, caracterizando-se por elevada permeabilidade e capacidade de atravessar membranas sem auxílio de proteínas transportadoras. Uma vez incorporado à membrana celular, torna-se indisponível para a própria célula, favorecendo o gradiente de difusão do meio externo para o interno (PRADO, 2020). Na maioria das espécies vegetais, o boro é imóvel no floema, sendo redistribuído apenas em plantas que produzem polióis, que se ligam ao elemento formando complexos móveis (BROWN; HU, 1998).

No metabolismo vegetal, o boro exerce funções estruturais e fisiológicas. No desenvolvimento vegetativo, participa da síntese da parede celular, auxiliando o cálcio na formação de pectatos que integram a lamela média e a parede primária, conferindo estabilidade e flexibilidade às células (PRADO, 2020). GUIMARÃES et al. (2023) destacam que aproximadamente 96% do boro encontrado nos tecidos vegetais está associado a substâncias pécticas, contribuindo para a extensibilidade plástica da parede celular. Outro papel relevante é a melhoria da fixação biológica de nitrogênio, uma vez que o boro, ao atuar na parede celular das raízes, promove ligação mais estável com bactérias do gênero *Rhizobium* (BOLAÑOS et al., 1996).

Plantas bem supridas com boro mantêm maior integridade das membranas, o que favorece a atividade de enzimas e canais proteicos, além de otimizar o transporte de carboidratos, que se complexam com o elemento, tornando-se mais solúveis (PRADO, 2020).

No crescimento reprodutivo, o boro é essencial para a formação e alongamento do tubo polínico, contribuindo para a deposição da parede celular nesse tecido. A disponibilidade adequada do nutriente também favorece a formação de sementes e reduz o abortamento de vagens (PRADO, 2008).

A eficiência do boro no desempenho fisiológico está diretamente ligada à sua concentração nos tecidos. CANTARELLA et al. (2022) indicam que o teor foliar adequado para a soja na fase de florescimento situa-se entre 21 e 55 mg kg^{-1} . De forma semelhante, RESENDE (2004) identificou, com base em diferentes autores, uma faixa de suficiência de 20 a 64 mg kg^{-1} . Essa informação complementa a

compreensão dos limites entre deficiência e toxicidade, já que concentrações abaixo da faixa de suficiência podem comprometer processos como crescimento celular, fixação de nitrogênio e desenvolvimento reprodutivo.

Estudos clássicos, como o de FURLANI et al. (2001), evidenciam que a ausência de boro resulta em sintomas severos de deficiência, como encurtamento de internódios, folhas jovens menores e deformadas e raízes de coloração escura e engrossadas. Quando confirmada a deficiência por análise foliar, recomenda-se, de acordo com CANTARELLA et al. (2022), a aplicação de 1 kg ha⁻¹ de boro na semeadura, preferencialmente em conjunto com herbicidas no sistema de plantio direto. Pulverizações foliares são frequentemente utilizadas de forma complementar, com o objetivo de favorecer a fecundação, a formação de grãos e a redução do abortamento de vagens (RESENDE, 2004).

Apesar da possibilidade de aplicação foliar, MALAVOLTA et al. (1989) defendem a aplicação via solo como estratégia mais eficiente para culturas como a soja, em razão da baixa mobilidade do boro no floema. Dessa forma, a redistribuição do nutriente das folhas mais velhas para as mais jovens é limitada, reforçando a importância de um manejo criterioso da adubação.

2.3 Toxicidade de boro

A soja (*Glycine max* L.) apresenta elevada sensibilidade à toxicidade de boro. Os sintomas iniciais manifestam-se como clorose irregular, evoluindo para manchas necróticas nas bordas das folhas, regiões com maior taxa de transpiração e, conseqüentemente, maior acúmulo do micronutriente (PRADO, 2020; KAISER et al., 2024).

A toxidez de boro reduz o teor de clorofila, principalmente devido à menor absorção e transporte de nitrogênio — elemento essencial à biossíntese do pigmento fotossintético (SANTOS et al., 2015). Além disso, a desorganização dos tilacoides compromete a estrutura dos cloroplastos e reduz a produção de pigmentos. WANG et al. (2011) destacam que estresses fisiológicos, como o excesso de boro, podem induzir acúmulo de amido nas folhas, e este, por sua vez, danifica as estruturas dos cloroplastos, prejudicando a síntese de clorofila. Outro efeito associado à toxidez é o extravasamento de eletrólitos, resultante do acúmulo intracelular de H₂O₂. Esse

acúmulo provoca ruptura das membranas celulares e inibe a ação de enzimas antioxidantes (JAMBUNATHAN, 2010).

Estudos de FURLANI et al. (2001) demonstraram que tanto a deficiência quanto o excesso de boro comprometem severamente o desenvolvimento da soja. O fornecimento de boro via solução a 2 mg.L^{-1} induziu sintomas de toxicidade, enquanto FAGERIA (2000) identificou que teores de $6,8 \text{ mg B kg}^{-1}$ no solo também foram considerados tóxicos. PRADO (2020) ressalta que existe uma estreita margem entre os níveis adequados e os tóxicos, sendo que em solos arenosos a toxicidade pode ocorrer com aplicações de apenas $3,8 \text{ kg ha}^{-1}$.

Em contrapartida, solos argilosos, devido à maior capacidade de adsorção do boro, toleram doses mais elevadas antes da manifestação de sintomas, como observado por FRANCO e GALLO (1976). Entretanto, mesmo em solos argilosos, a toxidez pode se manifestar caso haja acúmulo excessivo do elemento. Por outro lado, a ocorrência de chuvas frequentes ou irrigação adequada pode favorecer a lixiviação do boro em excesso, atenuando os efeitos tóxicos (KAISER et al., 2024).

A compreensão da toxicidade e de seus fatores condicionantes é essencial para o manejo eficiente do boro, especialmente no contexto deste estudo, que investiga o efeito residual de diferentes doses aplicadas via solo. Avaliar o comportamento do nutriente ao longo do tempo, considerando a dinâmica de disponibilidade no solo e sua relação com a fisiologia da planta, permite propor recomendações mais seguras para maximizar a produtividade sem incorrer em prejuízos por toxidez.

2.4 Fontes de aplicação de boro

O boro, elemento essencial ao desenvolvimento vegetal, pode ser fornecido às plantas por diferentes fontes, que variam em composição química, solubilidade, velocidade de liberação e adequação a determinadas condições de solo e clima. Entre as fontes mais utilizadas, destacam-se o ácido bórico (H_3BO_3), o bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), a ulexita [$\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$] e a colemanita [$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$], cada uma apresentando características específicas que influenciam a disponibilidade do nutriente para a cultura da soja (PRADO, 2020; CANTARELLA et al., 2022).

O ácido bórico é uma das fontes mais solúveis, apresentando rápida disponibilização no solo, sendo amplamente indicado para aplicações foliares ou via fertirrigação. Por outro lado, o bórax apresenta solubilidade moderada, sendo geralmente utilizado em aplicação ao solo para garantir suprimento em médio prazo. Fontes de liberação mais lenta, como ulexita e colemanita, são recomendadas para situações em que se deseja prolongar o fornecimento de boro, minimizando riscos de lixiviação em solos arenosos (LOPES; GUILHERME, 2016).

A escolha da fonte deve considerar fatores como a textura do solo, a frequência de irrigação, o histórico de adubação e a sensibilidade da cultura à toxicidade. No caso da soja, por se tratar de uma espécie sensível ao excesso de boro (KAISER et al., 2024), é fundamental que a dosagem seja ajustada de forma criteriosa, levando em conta a disponibilidade natural do solo e a época de aplicação.

2.5 Efeito residual do boro

O efeito residual refere-se à capacidade de uma aplicação prévia de boro fornecer o nutriente para cultivos subsequentes, sem a necessidade de reaplicações imediatas. Essa característica depende diretamente da fonte utilizada, da dose aplicada, da textura e matéria orgânica do solo, bem como do regime hídrico da área (PRADO, 2020; FAGERIA, 2000).

Em solos argilosos, com maior capacidade de retenção, o efeito residual tende a ser mais prolongado, especialmente quando se utilizam fontes de baixa solubilidade, como ulexita e colemanita. Já em solos arenosos, a lixiviação pode reduzir significativamente a persistência do boro, exigindo monitoramento frequente dos teores foliares e no solo (BOLANOS et al., 1996).

No manejo da soja, o aproveitamento do efeito residual pode reduzir custos de produção e riscos ambientais, desde que o planejamento de adubação seja realizado com base em análises químicas e diagnóstico nutricional preciso (Cantarella et al., 2022). Ademais, compreender a dinâmica residual do boro permite evitar tanto deficiências quanto toxicidade, promovendo maior eficiência no uso do nutriente ao longo de diferentes safras.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Arranjo experimental

O experimento foi conduzido na área experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP/FCAV), localizada no município de Jaboticabal – SP, Brasil (22° 43' 30" S; 47° 38' 00" O; altitude média de 546 m). O estudo foi realizado durante a safra 2024/2025, compreendendo o período de 12 de novembro de 2024 a 06 de março de 2025.

A área foi cultivada com milho no ciclo anterior (safra 2023/2024), ocasião em que foram aplicadas as doses de boro, visando avaliar o efeito residual do nutriente sobre a cultura subsequente de soja. O intervalo entre a aplicação no milho e a semeadura da soja foi de aproximadamente oito meses.

A cultivar utilizada foi TMG 7063 IPRO, semeada mecanicamente. Cada parcela experimental foi composta por nove linhas espaçadas em 0,45 m, com 18 m de comprimento, totalizando área de 21,6 m². A área útil para coleta de dados compreendeu as três linhas centrais (1,35 m de largura), desconsiderando 1 m das extremidades como bordadura, além de manter espaçamento de 4 m entre parcelas para evitar contaminação.

O manejo fitossanitário foi uniforme em todas as parcelas, adotando-se práticas recomendadas para controle de plantas daninhas, pragas e doenças conforme indicações técnicas para a cultura (EMBRAPA, 2013).

3.2 Análises físico-químicas e preparo do solo

Antes da implantação do experimento com soja, foram realizadas coletas em 10 pontos aleatórios da área útil de cada parcela, na profundidade de 0–20 cm, para análises químicas e físicas segundo metodologia de RAIJ et al. (2001). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados das análises químicas e físicas do solo da área experimental antes da semeadura da soja.

Areia	Silte	Argila	pH	MO	K	Ca	Mg	P	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
-----%-----			CaCl ₂	g dm ⁻³	---mmolc dm ⁻³ ---			----- mg dm ⁻³ -----						
24	21	54	6,1	22	3,3	32	13	33	6	0,42	0,60	13	28,2	2,7

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho eutroférico de textura argilosa (SANTOS et al., 2013). Considerando que o valor de pH inferior a 7 aumenta a suscetibilidade do boro à lixiviação quando aplicado na forma de ácido bórico (H₃BO₃) (FOLONI et al., 2016; SÁ et al., 2016), destaca-se que no presente estudo utilizou-se a fonte ulexita, de liberação mais lenta.

O preparo do solo seguiu o sistema convencional, com operações de subsolagem e gradagem.

3.3 Distribuição pluviométrica

Durante o período experimental, entre 16 de novembro de 2024 e 17 de fevereiro de 2025, foi registrada uma precipitação total de 663 mm, distribuída em 27 dias chuvosos. A precipitação média diária foi de aproximadamente 24,6 mm, sendo o maior evento registrado de 90 mm em um único dia, como mostrado no gráfico a seguir.

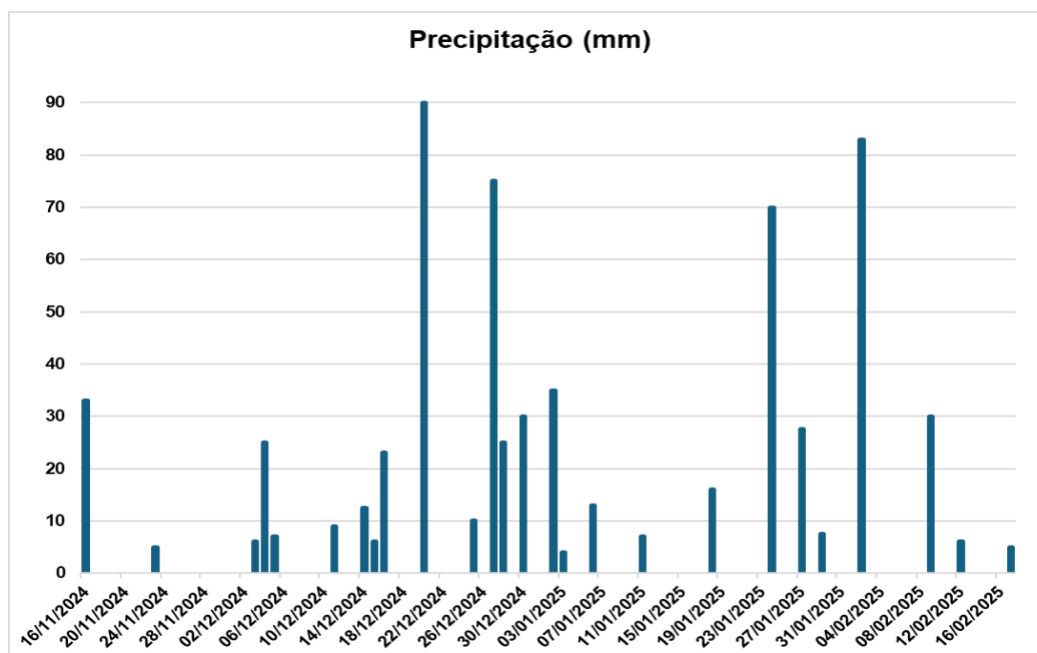


Gráfico 1 Distribuição pluviométrica (mm) durante os meses do experimento.

3.4 Tratamentos e aplicação das doses

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com cinco doses de boro (0, 3, 9, 27 e 81 kg ha⁻¹ de B), aplicadas na forma de ulexita (NaCaB₅O₉·8H₂O; 8% de B). As doses foram aplicadas apenas no cultivo do milho (safra 2023/2024), sendo incorporadas ao solo por grade aradora e niveladas por gradagem leve.

A escolha das doses visou abranger desde ausência de aplicação até valores superiores às recomendações agronômicas para soja (que variam de 1 a 2 kg ha⁻¹ de B, segundo EMBRAPA, 2013), permitindo avaliar respostas fisiológicas e produtivas sob excesso do micronutriente. Reconhece-se que doses elevadas, como 81 kg ha⁻¹, extrapolam a prática agrícola usual, sendo adotadas com finalidade estritamente experimental.

A fonte utilizada apresenta baixa solubilidade, o que reduz perdas por lixiviação, mas, por conter sódio e cálcio, pode influenciar a absorção de outros nutrientes. Optou-se por não utilizar ácido bórico ou outras fontes mais solúveis para manter a consistência metodológica e focar no efeito residual da ulexita.

3.5 Índice de tolerância

O índice de tolerância (IT) foi calculado segundo NAZIR et al. (2023), considerando biomassa seca (parte aérea) coletada no momento da colheita:

$$IT = (\text{massa seca tratada} / \text{massa seca controle}) \times 100$$

A coleta da biomassa foi realizada na fase de maturação fisiológica (R7), abrangendo plantas das três linhas centrais da área útil, com corte rente ao solo e secagem em estufa a 65 °C até peso constante.

3.6 Índice de clorofila

O índice de clorofila (IC) foi determinado em 16 de janeiro de 2025 com medidor multi-pigmentos MPM-100 Multipigment Chlorophyll Meter (ADC BioScientific Ltd.), realizando-se leituras na folha-trifólio mais jovem, totalmente expandida, no período da manhã, evitando estresse hídrico.

3.7 Produtividade

A colheita da soja foi realizada em 06 de março de 2025, retirando-se as plantas das três linhas centrais de cada parcela. Os grãos foram trilhados, pesados e submetidos à determinação da umidade, corrigida para 13%, obtendo-se a produtividade expressa em kg ha⁻¹.

3.8 Análise de dados

Os dados foram analisados para verificação da presença de outliers utilizando o método de quartis (VINUTHA et al., 2018) e submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$) e homogeneidade de Levene ($p > 0.05$). Em seguida, realizou-se estudos de regressão polinomial e utilização da Fórmula de Bhaskara para determinar o ponto de maior valor da variável e o ponto que diminui 10% do valor da variável.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação de diferentes doses de boro, via solo e na forma de ulexita, promoveu respostas consistentes nos parâmetros fisiológicos e produtivos da soja, evidenciando um padrão de comportamento semelhante entre o índice de clorofila (IC), o índice de tolerância (IT) e a produtividade. A análise estatística revelou que, para todas as variáveis, o ajuste mais adequado foi o modelo quadrático, com elevados coeficientes de determinação (R^2), demonstrando forte associação entre as doses aplicadas e as respostas obtidas. Tal padrão reforça a premissa de que o boro apresenta uma estreita margem entre deficiência e toxicidade, sendo imprescindível um manejo criterioso para garantir seus efeitos benéficos.

O índice de clorofila apresentou incremento inicial com o aumento das doses de boro, atingindo valor máximo de 0,70 na dose de 13 kg ha⁻¹

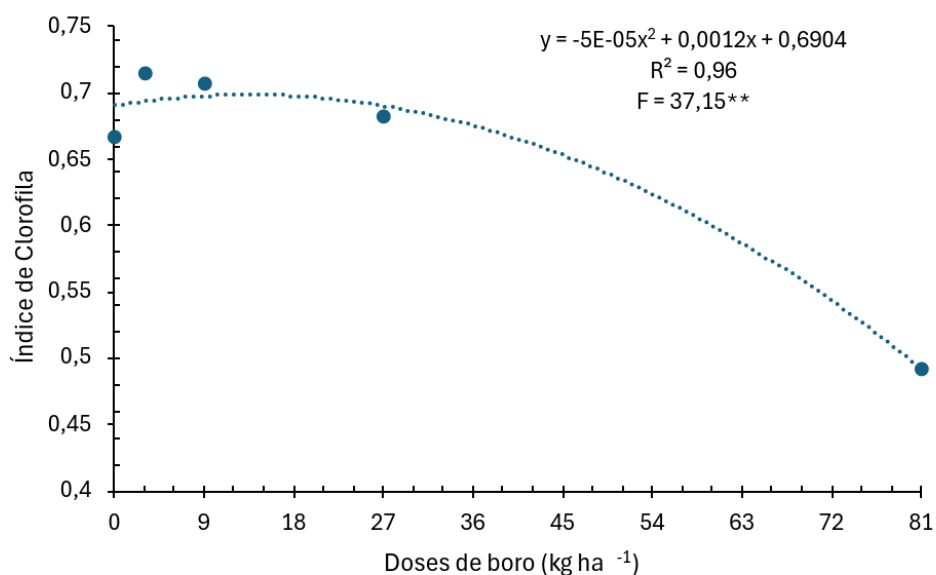


Figura 1 Efeito residual da aplicação de boro (kg ha⁻¹) no índice de clorofila na cultura da soja.

Acima desse ponto, observou-se redução progressiva para 0,63 na dose de 51 kg ha⁻¹. Esse comportamento confirma que doses moderadas favorecem a síntese e preservação dos pigmentos fotossintéticos, enquanto concentrações elevadas induzem efeitos fitotóxicos. Segundo SILVA et al. (2019) e COSTA et al. (2021), a toxicidade de boro provoca danos estruturais aos cloroplastos e reduz a produção de

pigmentos, afetando diretamente a taxa fotossintética e, conseqüentemente, a produtividade.

A resposta positiva do IC em doses intermediárias pode ser atribuída ao papel estrutural do boro na integridade das membranas e na estabilidade dos tilacoides, assegurando maior preservação dos complexos pigmento-proteicos (MARSCHNER, 2012). Além disso, o boro participa do transporte e metabolismo de carboidratos, fornecendo energia para a fotossíntese. Em excesso, no entanto, pode induzir acúmulo de espécies reativas de oxigênio (H_2O_2), promovendo peroxidação lipídica e extravasamento de eletrólitos, o que resulta na degradação dos pigmentos (JAMBUNATHAN, 2010).

O índice de tolerância apresentou comportamento semelhante ao IC, com valor máximo próximo a 100% para a dose de 10 kg ha^{-1} e redução para 88% na dose de 27 kg ha^{-1} .

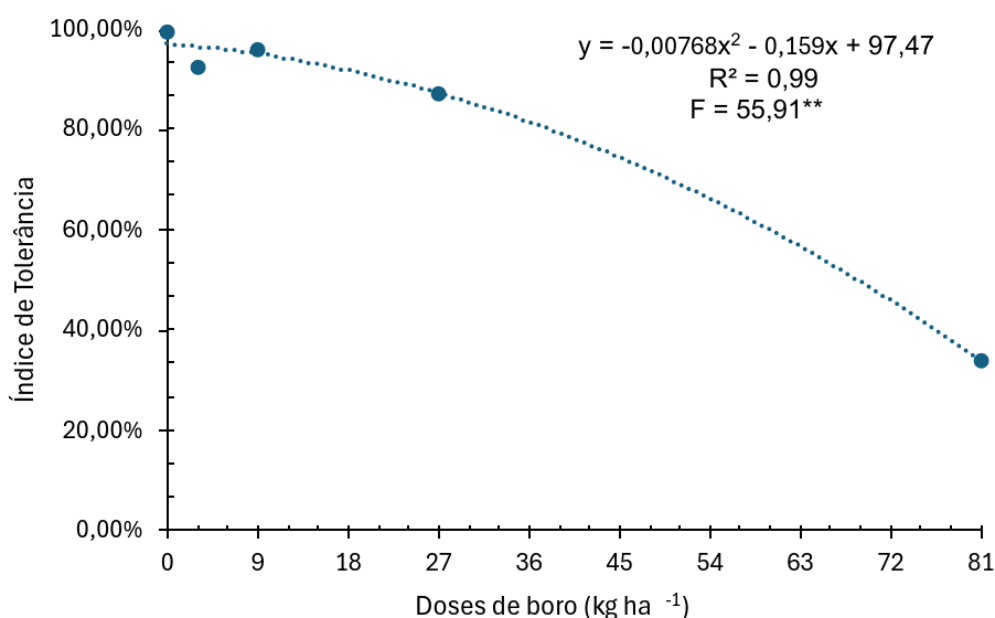


Figura 2 Efeito residual da aplicação de boro (kg ha^{-1}) no índice de tolerância na cultura da soja.

Em condições adequadas, o boro contribui para o crescimento e manutenção da integridade estrutural, enquanto concentrações excessivas reduzem a capacidade adaptativa da soja diante de estresses. FREITAS et al. (2020) destacam que, embora essencial, o boro possui faixa estreita de suficiência, e seu excesso pode interferir

diretamente em processos fisiológicos fundamentais. A relação entre IC e IT indica interdependência: a preservação dos pigmentos fotossintéticos está associada a maior tolerância geral da planta. Tal convergência sugere que medições não destrutivas do IC podem ser utilizadas como indicador rápido para ajustes no manejo do boro em campo, conforme sugerido por SOUZA et al. (2022).

A produtividade apresentou padrão quadrático significativo, com máxima estimada em aproximadamente 3.735 kg ha⁻¹ na dose de 12 kg ha⁻¹, enquanto na dose de 79 kg ha⁻¹ houve redução para 3362 kg ha⁻¹.

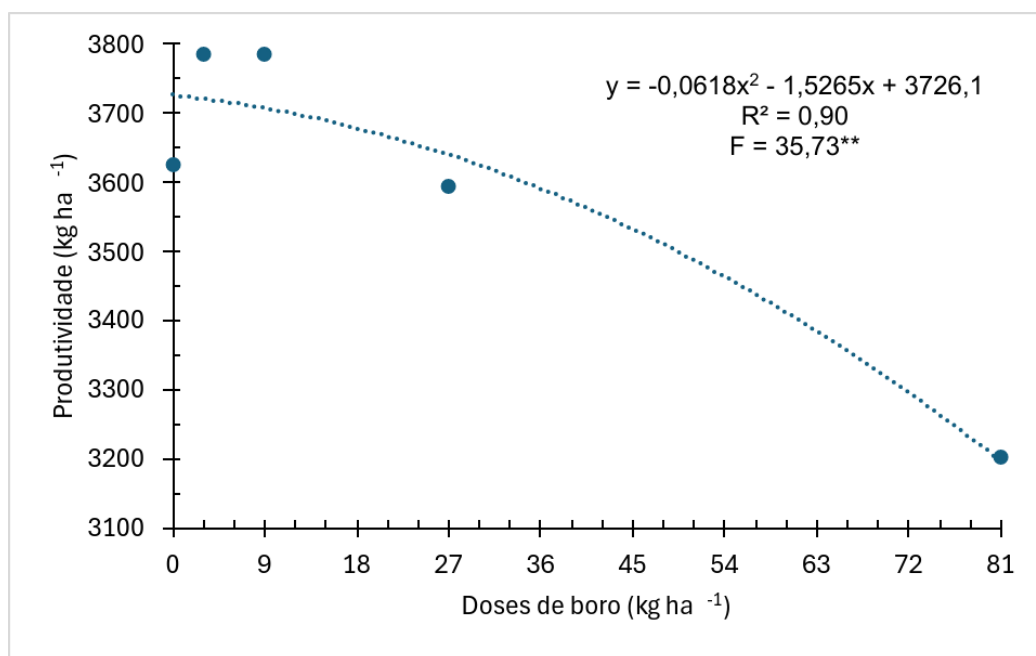


Figura 3 Efeito residual da aplicação de boro (kg ha⁻¹) na produtividade (kg ha⁻¹) na cultura da soja

O aumento inicial pode ser explicado pelo papel do boro na formação e alongamento do tubo polínico, na fertilização e no enchimento de grãos (BELLAL, 2018). Em condições adequadas, o boro favorece a translocação de fotoassimilados para órgãos reprodutivos, aumentando o peso dos grãos (SHORROCKS, 1997; RAVEN et al., 2013).

Doses acima do ponto ótimo resultaram em quedas acentuadas, corroborando GUPTA et al. (1985), que apontam que o excesso de boro causa necrose foliar, redução da área fotossintética e distúrbios reprodutivos. SOUZA et al. (2020) observaram padrão semelhante em solos argilosos, confirmando que, mesmo com maior capacidade de retenção, esses solos não são imunes aos efeitos tóxicos.

A análise conjunta de IC, IT e produtividade mostram que a faixa ótima de máxima eficiência técnica situa-se entre 10 e 13 kg ha⁻¹, indicando possibilidade de manejo integrado com base em indicadores fisiológicos e de rendimento. Tal convergência de resultados reforça a consistência do experimento e sugere que estratégias de monitoramento em tempo real, associadas a análises químicas de solo, podem otimizar a adubação boratada.

O solo experimental, de textura argilosa e baixo teor inicial de boro (0,42 mg dm⁻³), aliado ao uso da ulexita, favoreceu o efeito residual observado, reduzindo perdas por lixiviação. Conforme KAISER et al. (2024), solos argilosos retêm boro por mais tempo, sobretudo quando associadas fontes de baixa solubilidade.

Apesar dos resultados consistentes, a ausência de monitoramento periódico dos teores de boro no solo e nas folhas limitou a avaliação direta da persistência e absorção do nutriente. Estudos futuros devem integrar esse acompanhamento para aprimorar as recomendações, especialmente em sistemas de rotação de culturas.

Embora doses tão elevadas quanto 81 kg ha⁻¹ não sejam usuais em manejo agrícola, sua inclusão no experimento permitiu definir com clareza os limites de toxicidade, estabelecendo margens seguras para o uso do micronutriente.

De forma geral, os resultados ampliam o conhecimento sobre a resposta da soja à adubação boratada, permitindo estabelecer faixas seguras que maximizem o desempenho fisiológico e produtivo, explorando o efeito residual de fontes de liberação lenta. Esse manejo, aliado a práticas de monitoramento em tempo real, representa uma estratégia sustentável para maximizar produtividade e evitar impactos negativos.

A aplicação de boro via solo, na forma de ulexita, demonstrou efeito significativo sobre parâmetros fisiológicos e produtivos da soja, evidenciando que doses superiores às usualmente recomendadas na literatura promoveram ganhos expressivos até um limite crítico, a partir do qual se observou toxicidade. O ponto de máxima resposta foi identificado entre 10 e 13 kg ha⁻¹ de boro, com valores estimados de IT próximo a 100%, IC de 0,70 e produtividade de 3.735 kg ha⁻¹. Esses resultados confirmam que, sob determinadas condições de solo e manejo, é possível alcançar incrementos substanciais no desempenho da cultura utilizando doses moderadamente superiores às preconizadas, desde que se evite ultrapassar o limiar tóxico.

Quando comparados com dados da literatura, os valores obtidos mostram-se coerentes com estudos que também observaram curvas de resposta quadrática para parâmetros fisiológicos e de rendimento. SILVA et al. (2019) e COSTA et al. (2021) relataram que o IC máximo é alcançado com doses intermediárias de boro, variando de 8 a 14 kg ha⁻¹, dependendo da cultivar e das condições edafoclimáticas, resultados próximos aos encontrados neste trabalho. No presente estudo, o IC de 0,70, obtido com 13 kg ha⁻¹, está acima dos valores médios relatados por KAISER et al. (2024) para solos argilosos (0,65 a 0,68), sugerindo que a fonte utilizada (ulexita) e as características do solo experimental favoreceram maior eficiência na manutenção dos pigmentos fotossintéticos.

Em relação ao índice de tolerância, NAZIR et al. (2023) destacam que valores próximos a 100% indicam plena adaptação das plantas às condições de manejo. No presente experimento, esse patamar foi atingido com 10 kg ha⁻¹, coincidindo com a faixa em que também se observou elevada biomassa seca. FREITAS et al. (2020) identificaram IT máximo de 95 a 98% em soja cultivada com 9 a 11 kg ha⁻¹ de boro, o que reforça a consistência dos dados aqui obtidos. A proximidade desses valores corrobora a noção de que a faixa ótima de doses para maximizar o IT e o IC é estreita, exigindo manejo cuidadoso para evitar perdas por excesso.

Quanto à produtividade, o rendimento máximo estimado neste estudo (3.735 kg ha⁻¹) com 12 kg ha⁻¹ de boro supera valores relatados por SOUZA et al. (2020), que observaram produtividades de 3.500 a 3.600 kg ha⁻¹ para doses entre 9 e 12 kg ha⁻¹ em solos de textura argilosa. Essa diferença positiva pode estar relacionada à disponibilidade gradual do boro fornecido pela ulexita, reduzindo perdas por lixiviação e permitindo suprimento contínuo ao longo do ciclo da soja. Além disso, o teor inicial de boro no solo (0,42 mg dm⁻³) era baixo, o que pode ter favorecido maior resposta à adubação.

No entanto, é importante ressaltar que as doses mais elevadas, como 27, 51 e principalmente 81 kg ha⁻¹, provocaram quedas significativas em todos os parâmetros avaliados, confirmando o risco de toxicidade relatado por FAGERIA (2000) e GUPTA et al. (1985). Em doses acima de 20 kg ha⁻¹, observou-se redução acentuada no IC e no IT, acompanhada por queda expressiva na produtividade, comportamento já documentado por KAISER et al. (2024) para solos argilosos. Esses autores alertam que, mesmo em solos com maior capacidade de retenção de boro, o

excesso pode provocar acúmulo nos tecidos foliares, comprometendo a fotossíntese e a formação de grãos.

O confronto com a literatura também evidencia que, apesar de as recomendações tradicionais para soja no Brasil girarem em torno de 1 a 2 kg ha⁻¹ de boro (EMBRAPA, 2013; CANTARELLA et al., 2022), estudos recentes apontam que doses mais elevadas podem ser benéficas em determinadas condições, especialmente quando associadas a fontes de baixa solubilidade e em solos de textura argilosa. Contudo, a extrapolação desses resultados para diferentes regiões e cultivares deve ser feita com cautela, considerando-se as variações de clima, tipo de solo e histórico de manejo.

Os achados deste trabalho têm relevância prática para o manejo da adubação boratada em sistemas de rotação de culturas. O uso de fontes como a ulexita, com liberação gradual, permite explorar o efeito residual do nutriente, reduzindo a necessidade de reaplicações frequentes. Em solos argilosos, esse efeito pode se estender por mais de um ciclo, como apontam KAISER et al. (2024) e FURLANI et al. (2001), desde que o manejo evite o acúmulo excessivo.

Ainda assim, a ausência de monitoramento dos teores de boro no solo e nas folhas durante o ciclo limita a compreensão plena da dinâmica de absorção e do efeito residual. Recomenda-se que futuros estudos incorporem avaliações periódicas, aliando análise química e diagnósticos foliares, para ajustar as doses em tempo real e evitar riscos de toxidez.

Em síntese, este estudo confirma que a faixa de 10 a 13 kg ha⁻¹ de boro, aplicada via ulexita, é capaz de maximizar simultaneamente o índice de clorofila, o índice de tolerância e a produtividade da soja em solos argilosos com baixo teor inicial de boro. Essa faixa coincide com resultados de outros autores, mas apresenta valores ligeiramente superiores em produtividade e IC, possivelmente devido à interação positiva entre a fonte utilizada e as condições edafoclimáticas. Tais evidências reforçam que, embora doses acima das recomendações tradicionais possam ser vantajosas em contextos específicos, a decisão de aplicá-las deve ser embasada em diagnóstico preciso, integrando análises de solo, observação de sintomas e monitoramento fisiológico da cultura.

5.CONCLUSÃO

Este estudo indica que a faixa de 10 a 13 kg ha⁻¹ de boro, aplicada via ulexita, é capaz de maximizar simultaneamente o índice de clorofila, o índice de tolerância e a produtividade da soja em solos argilosos com baixo teor inicial de boro.

REFERÊNCIAS

BELLAL, M. M. Boron fertilization effects on growth, yield and quality of soybean. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, v. 13, n. 2, p. 45-54, 2018.

BOLAÑOS, L.; BREWIN, N.; BONILLA, I. Effects of boron on rhizobium-legume cell-surface interactions and nodule development. *Plant Physiology, Rockville*, v. 110, p. 1249-1256, 1996.

BROWN, P. H.; HU, H. Manejo do boro de acordo com sua mobilidade nas diferentes culturas. *Informações Agronômicas*, n. 84, 1998.

BYERS, D. E.; MIKKELSEN, R. L.; COX, F. R. Greenhouse evaluation of four boron fertilizer materials. *Journal of Plant Nutrition*, v. 24, n. 4-5, p. 717-725, 2001.

CANTARELLA, H. et al. Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônomo, 2022. p. 489.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2024/2025. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>

DEGRYSE, F. Boron fertilizers: use, challenges and the benefit of slow-release sources. *Journal of Boron*, v. 2, n. 3, p. 111-122, 2017.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de boro na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 4, n. 1, p. 57-62, 2000.

FOLONI, J. S. S. et al. Efeitos da gessagem e da adubação boratada sobre os componentes de produção da cultura do amendoim. *Scientia Agraria Paranaensis*, v. 15, n. 2, p. 202-208, 2016.

FURLANI, A. et al. Exigência a boro em cultivares de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 929-937, 2001.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Boro. Portal Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/producao/micronutrientes/boro>.

GUPTA, U. C.; JAME, Y. W.; CAMPBELL, C. A. Boron toxicity and deficiency: a review. Canadian Journal of Soil Science, v. 65, n. 3, p. 381-409, 1985.

HIRAKURI, M. H. et al. Soja. Portal Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre-producao>.

JAMBUNATHAN, N. Determination and detection of reactive oxygen species (ROS), lipid peroxidation, and electrolyte leakage in plants. Methods in Molecular Biology, v. 639, p. 291-297, 2010.

KAISER, D. E.; ROSEN, C. J.; SUTRADHAR, A. K. Boron for Minnesota soils. Disponível em: <https://extension.umn.edu/micro-and-secondary-macronutrients/boron-minnesota-soils>.

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

NAZIR, F. et al. Methyl jasmonate influences ethylene formation, defense systems, nutrient homeostasis and carbohydrate metabolism to alleviate arsenic-induced stress in rice (*Oryza sativa*). Plant Physiology and Biochemistry, v. 202, 2023.

OLIVEIRA, L. B. et al. Fatores que afetam a disponibilidade de boro no solo para as plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. (ed.). Boron na agricultura. Viçosa: UFV, 2007. p. 1-27.

PRADO, R. M. Nutrição de plantas: diagnose foliar em grandes culturas. Jaboticabal: Capes/Fundes, 2008.

PRADO, R. M. Nutrição de plantas. 2. ed. São Paulo: Editora Unesp, 2020.

RAIJ, B. van et al. Métodos de análise de solo. Campinas: Instituto Agronômico, 1996.

RAIJ, B. van et al. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico/Fundação IAC, 1997.

RAVEN, J. A.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. Biologia vegetal. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2013

RESENDE, Á. V. Adubação da soja em áreas de cerrado: micronutrientes. Planaltina, DF: Embrapa, 2004.

SÁ, A. A.; ERNANI, P. R. Boron leaching decreases with increases on soil pH. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 40, 2016.

SANTOS, H. J. M. et al. Comportamento bioquímico de plantas jovens de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* afetadas por toxidez de boro. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

SFREDO, G. J.; BORKERT, C. M. Deficiências e toxicidades de nutrientes em plantas de soja: descrição dos sintomas e ilustração com fotos. Londrina: Embrapa Soja, 2004. (Documentos, 231).

SHORROCKS, V. M. The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant and Soil*, v. 193, n. 1-2, p. 121-148, 1997.

SOUZA, C. A. et al. Resposta da soja à adubação com boro em solo argiloso. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 67, n. 3, p. 189-198, 2020.

SOUZA, T. R. et al. Índice de clorofila como indicador não destrutivo do estado nutricional de soja adubada com boro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 46, 2022.

USDA. United States Department of Agriculture. World Agricultural Supply and Demand Estimates. Washington, 2025. Disponível em: <https://www.usda.gov>

VINUTHA, H. P.; POORNIMA, B.; SAGAR, B. M. Detection of outliers using interquartile range technique from intrusion dataset. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, v. 701, p. 511-518, 2018.

WANG, J. Z. et al. Changes in photosynthetic properties and antioxidative system of pear leaves to boron toxicity. *African Journal of Biotechnology*, v. 10, n. 85, 2011.