



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

LARISSA SARTORI DAMETO

**PRODUÇÃO E QUALIDADE DE SEMENTES DE SOJA EM
RESPOSTA A FONTES E DOSES DE BORO EM UM
LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO**

Londrina
2022

LARISSA SARTORI DAMETO

**PRODUÇÃO E QUALIDADE DE SEMENTES DE SOJA EM
RESPOSTA A FONTES E DOSES DE BORO EM UM
LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Adônis Moreira

Londrina
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

D157p Dameto, Larissa Sartori.

Produção e qualidade de sementes de soja em resposta a fontes e doses de boro em um latossolo vermelho distrófico / Larissa Sartori Dameto. - Londrina, 2022.

75 f. : il.

Orientador: Adônis Moreira.

Coorientador: Francisco Carlos Krzyzanowski.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2022.

Inclui bibliografia.

1. Glycine max - Tese. 2. Fertilizante boratado - Tese. 3. Componentes de produção - Tese. 4. Qualidade das sementes - Tese. I. Moreira, Adônis . II. Carlos Krzyzanowski, Francisco. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU 63

LARISSA SARTORI DAMETO

**PRODUÇÃO E QUALIDADE DE SEMENTES DE SOJA EM
RESPOSTA A FONTES E DOSES DE BORO EM UM
LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito à obtenção do título de Mestre em Agronomia

BANCA EXAMINADORA

Orientador Prof. Dr. Adônis Moreira
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. Marco Eustaquio de Sá
Universidade Estadual Paulista – UNESP

Prof. Thadeu Rodrigues de Melo
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 23 de fevereiro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a toda minha família, em especial aos meus pais, 'Marcia' e 'Devanir', minha irmã 'Talita', minha 'avó Maria Cecilia' e 'tia Adriana', pelo amor, incentivo e apoio que sempre me deram.

À 'Bruna', companheira da época de Graduação e Mestrado e a 'Anelise' por ajudar dividir as minhas contas e parceria.

Aos meus orientadores, Dr. 'Adônis Moreira' e Dr. 'Francisco C. Krzyzanowski', pela atenção, dedicação, amizade e por todos os ensinamentos.

À 'Crislaine' pelo apoio nas análises e amizade.

À Dra 'Larissa A. C. Moraes' da Embrapa Soja e ao Dr. Marco Eustáquio de Sá da Unesp de Ilha Solteira, pelo apoio e revisão do trabalho de Dissertação.

À CAPES e CNPq pelos recursos financeiros para realização deste trabalho.

À UEL e a Universidade Estadual Paulista (UNESP-Campus Ilha Solteira), por todo conhecimento e suporte que me deram durante esses anos.

Aos Professores da UEL pelos ensinamentos passados.

À Embrapa Soja, por todas as experiências e aprendizados, além de amizades que levarei para a vida.

Aos técnicos de apoio do Laboratório de Sementes da Embrapa Soja pelos ensinamentos, companheirismo e suporte na realização dos experimentos.

Obrigada a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão dessa etapa, sem vocês nada disso seria possível, minha eterna gratidão!

Dameto, Larissa Sartori. **Produção e qualidade de sementes de soja em resposta a fontes e doses de boro em um Latossolo Vermelho Distrófico**. 2022. 80 f. Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2022.

RESUMO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é o principal produto agrícola de exportação do país e estudos têm mostrado que a nutrição adequada das plantas é fundamental para manter a qualidade das sementes e alcançar altas produtividades. A carência de boro (B) afeta a produção da soja, diminuindo o número de sementes por vagens e número de nós por planta, não havendo especificações de doses adequadas as diversas condições edafoclimáticas do Brasil. Neste trabalho, objetivou-se avaliar o efeito de fontes de boro aplicadas ao solo em diferentes doses na qualidade das sementes e nos componentes de produção da soja. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 × 5, com duas fontes de boro [ácido bórico (18% de B) e ulexita (12% de B)], aplicadas em cinco doses (0, 2, 4, 8 e 16 mg kg⁻¹), com quatro repetições. A cultivar BRS 1003 IPRO de crescimento indeterminado foi utilizada. Exceto a relação NGV/NVV, a produção de MSPA, NGV, NVV e peso de 100 grãos foram influenciados pelos tratamentos com interação fontes × doses de B. Houve incremento dos teores de B disponível no solo e folha diagnósticos com o aumento das doses de B com os maiores teores na fonte H₃BO₃ em relação a ulexita. A produção máxima de grãos não apresentou efeito das fontes e foi obtida com a aplicação de 4 kg ha⁻¹ para aplicação em sistema plantio direto. Apesar do teor de B disponível no solo ter apresentado correlação significativa com o teor foliar, a equação forneceu capacidade preditiva relativamente baixa em relação a estimativa da PG. o envelhecimento acelerado (EA) e porcentagem de germinação não sofrem influência de fontes e doses de B, enquanto o peso de 100 sementes, comprimento radicular de plântulas (CR) e protrusão radicular (PR) apresentaram interação fontes × doses e estão intimamente relacionados a disponibilidade do nutriente no solo, o que não foi observado para o comprimento da parte área da planta (CPA). O VR apresenta relação significativa com as doses de B e está diretamente correlaciona com a PG. No caso do teor de lignina no tegumento (LT), independente da fonte de B, houve relação inversa das doses em relação ao teor de LT, indicando possível efeito negativo no processo de armazenamento e longevidade da semente.

Palavras-chave: *Glycine max*; fertilizante boratado; componentes de produção; qualidade das sementes.

Dameto, Larissa Sartori. **Soybean seed production and quality in response to boron sources and doses in a Distrofic Red Latosol**. 2022. 80 p. Master's Dissertation in Agronomy – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2022.

ABSTRACT

Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) is the country's main agricultural export and studies have shown that adequate plant nutrition is essential to maintain seed quality and achieve high yields. The boron (B) lack affects soybean yield, decreasing the number of seeds per pod and number of nodes per plant, there are no specifications of adequate doses for the different edaphoclimatic conditions in Brazil. The objective of this work was to evaluate the effect of boron sources applied to the soil at different doses on seed quality and yield components. The experimental design used was completely randomized in a 2 × 5 factorial scheme, with two B sources [boric acid, H₃BO₃ (18% of B) and ulexite (12% of B)], applied in five rates (0, 2, 4, 8, and 16 mg kg⁻¹), with four replicates. The indeterminate growth BRS 1003 IPRO cultivar was used. Except for the NGV/NVV ratio, the yield of shoot dry weight (SDW), NGP, NPP, and weight of 100 grains were influenced by treatments with interaction sources × rates. There was an increase in the levels of available B in the soil and diagnostic leaf with increasing doses of B with the highest contents in the H₃BO₃ source in relation to ulexite. The maximum GY did not show an effect of the sources and was obtained with the 4 kg ha⁻¹ for application in no-till system. Although the available B in the soil showed a significant correlation with the foliar content, the equation provided a relatively low predictive capacity in relation to the GY estimate. the accelerated aging (EA) and germination percentage are not influenced by sources and doses of B, while the weight of 100 seeds, seedling root length (CR) and root protrusion (PR) showed sources × rates interaction and are closely related to availability of the nutrient in the soil, which was not observed for the length of the plant part area. RV has a significant relationship with B rates and is directly correlated with GY. In the case of the lignin content in the tegument (LT), regardless of the B source, there was an inverse relationship between the rates in relation to the LT content, indicating a possible negative effect on the storage process and seed longevity.

Keywords: *Glycine max*; borate fertilizer; yield componentes; seed quality.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Principais países produtores e importadores de soja. Fonte: Conab e Secex (dez. 2021)14
- Figura 2** – Reações entre polióis e ácido bórico envolvidas na síntese de complexos de borato com compostos contendo grupos cis-hidroxila (BÖSEKEN, 1949).....17
- Figura 3** – Diagrama mostrando o transporte radial do ácido bórico a partir da solução do solo, passando através da membrana plasmática para o citosol das células da raiz por difusão passiva ou com o auxílio do transportador NIP5;1, seguindo o gradiente de concentração. O transportador BOR1 exporta ácido bórico ou borato convertido a partir de ácido bórico no citosol da planta, onde o pH é maior do que no apoplasma, sendo então carregado no xilema. O citoplasma é conectado por plasmodesmos entre as células. A via simplástica refere-se ao fluxo de célula para célula. A via apoplástica refere-se à via extracelular fornecida pela matriz contínua das paredes celulares (redesenhado de Takano *et al.*, 2008)20
- Figura 4** – Sintomas de toxidez de boro no tratamento com aplicação de 8 e 16 mg kg⁻¹ de B com a fonte H₃BO₃.....48
- Figura 5** – Correlação B disponível no solo e na folha e teores de B disponível no solo e total na folha diagnóstico com pecíolo em resposta as fontes e doses de B. *significativo a 5% de probabilidade49
- Figura 6** – Correlação B disponível no solo e na folha diagnóstico com a produção de grãos. TME, teor máximo estimado. *significativo a 5% de probabilidade.....50
- Figura 7** – Produção de grãos (PG) por vaso em resposta as doses e fontes de boro. CV, coeficiente de variação.....51
- Figura 8** – Teor de lignina no tegumento das sementes de soja em resposta à aplicação de fontes e doses de boro.....64
- Figura 9** – Efeito das fontes e dose de B sobre o volume de raízes (VR) nos vasos e sua correlação com a produção de grãos (PG). *significativo a 5% de probabilidade.....65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Balanço da oferta e demanda de soja, no Brasil, em mil t.	15
Tabela 2 – Matéria seca da parte área (MSPA), número de vagens por vaso (NVV), número de grãos por vaso (NGV), relação NGV/NVV e peso de 100 grãos da soja em resposta a fontes e doses de boro	45
Tabela 3 – Atributos químicos do solo após a colheita da soja em resposta a fontes e doses de boro	46
Tabela 4 – Teores de nutrientes na folha diagnóstico com pecíolo da soja em resposta a fontes e doses de boro	47
Tabela 5 – Médias de envelhecimento acelerado (EA), germinação, comprimento da parte área (CPA) e de raízes (CR) de plântulas, protrusão de raízes e peso de 100 sementes em resposta à aplicação de fontes e doses de boro	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	IMPORTÂNCIA DA SOJA	14
2.2	BORO NA PLANTA.....	16
2.3	BORO NO SOLO.....	21
2.4	IMPORTÂNCIA DOS TESTES DE QUALIDADE DE SEMENTES.....	23
2.4.1	Teste de Germinação	24
2.4.2	Protrusão de Raízes Primárias.....	24
2.4.3	Envelhecimento Acelerado	25
2.4.1	Teor de Lignina.....	26
3	MATERIAS E MÉTODOS	27
3.1	LOCAL DO EXPERIMENTO, TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	27
3.2	ANÁLISES REALIZADAS	28
3.2.1	Teste de Germinação	28
3.2.2	Comprimento de Plântula	28
3.2.3	Envelhecimento Acelerado	28
3.2.4	Emissão de Raízes Primárias.....	29
3.2.5	Concentração de Lignina.....	29
3.2.6	Determinação do Teor de Boro e Nutrientes na Folha Diagnóstico.....	30
3.2.7	Componentes de Produção	31
3.2.8	Análise dos Atributos Químicos do Solo.....	31
3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	31
4	RESULTADOS	32
4.1	ARTIGO A	32
4.2	ARTIGO B	51
5	CONCLUSÕES	66
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1.INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine Max* (L.) Merrill) é considerada uma cultura de grande importância, sendo o Brasil o maior produtor mundial do grão. É a cultura agrícola com maior área plantada, chegando a 36.944,9 mil hectares na safra 2019-2020, com acréscimo de 3,0% quando comparada à safra anterior (CONAB, 2022).

Na produção de soja, uma das etapas considerada mais importante é a aquisição de sementes de alta qualidade, no entanto, inúmeros fatores influenciam essa variável, como por exemplo, o manejo da fertilidade do solo. Para seu bom desenvolvimento, além do carbono, oxigênio e hidrogênio, a planta necessita de nutrientes provenientes do solo, como, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Mn, Fe, Zn, Mo, Ni e Co ou oriundos da fertilização mineral.

O boro (B) é um micronutriente utilizado na cultura da soja, e sua carência acarreta perdas significativas na produtividade. Nos solos tropicais e subtropicais altamente intemperizados e ácidos, a deficiência torna-se muitas vezes frequente e apresenta relação direta com a formação e a qualidade das colheitas.

Nas sementes, a reserva de B é fundamental para manter o alto poder germinativo e levar a formação de plântulas normais. É um elemento que tem participação significativa na formação do fruto/semente, pois interfere na divisão e alongação celular, germinação do pólen, alongação do tubo polínico e fecundação.

Nas plantas, atua em várias funções, como a respiração, transporte de açúcares, metabolismo de carboidratos, síntese e estruturação de células-guarda, lignificação, RNA, síntese e estruturação de fenóis e ácido índol acético (AIA) (DECHEN; NACHTIGALL, 2007). A produção da cultura é altamente afetada quando há deficiência desse nutriente, visto que o B participa diretamente no pegamento das flores, formação e enchimento de grãos, desenvolvimento e crescimento da cultura, resistência a doenças, fotossíntese e na síntese de proteínas.

A deficiência é muito comum em solos arenosos e pobres em matéria orgânica, sendo notada nas plantas nos órgãos mais jovens, justamente por ser imóvel no floema e não se distribuir por toda a planta. A soja é sensível a toxidez de B, mas pode absorver esse nutriente tanto via solo quanto foliar.

A aplicação via solo, no entanto, é a mais eficiente por proporcionar uma correção mais lenta, gradual e preventiva. Além disso, o pH e teores da fração de argila do solo são fatores que atuam para maior eficiência na disponibilidade do B para a planta, já que a ação desse nutriente é influenciada pelas condições químicas e físicas do solo.

Devido a provável existência de uma faixa estreita de toxidez e deficiência do nutriente, questionamentos sobre as doses e fontes de nutrientes na aplicação da cultura da soja ainda são frequentes, dado o número de prejuízos que ocorrem devido o emprego inadequado do nutriente na cultura. Com isso, o presente trabalho tem como objetivo identificar a dose ideal de ácido bórico e ulexita aplicados ao solo, como fontes de boro.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 IMPORTÂNCIA DA SOJA

Conhecida pela sua grande importância econômica e social, a cultura da soja tem destaque no mercado mundial, e manifesta desde a segunda metade do século XX, grande relevância no mercado internacional, como “forrageira ou adubo verde”. Ocupa a posição de quarto grão mais consumido no mundo, perdendo somente para o milho, trigo e arroz.

Mantendo o Brasil como o maior produtor mundial da oleaginosa (FIGURA 1), o quarto levantamento da safra 2021-2022 feito pela Conab, estima uma produção de 140.500 mil Kg de soja, com uma área plantada de 40.40 mil ha, havendo um aumento de 3,8% na área semeada em relação a 2020-2021. Para o Paraná, a produção se encontra, até o momento, em 18.466 mil kg (CONAB, 2022).



Figura 1. Principais países produtores e importadores de soja. Fonte: Conab e Secex (dez. 2021).

Dentre os estados brasileiros com maior destaque na produção da cultura, temos o Mato Grosso (28%), Paraná (19%), Rio Grande do Sul (14%), Goiás (10%) e Mato Grosso do Sul (7%), sendo que a produção dos dois primeiros estados representa quase metade da produção nacional (CONAB, 2022).

Sua demanda não gira em torno somente do grão (soja in natura), mas também da forma de farelo ou óleo (TABELA 1). Em 2020, a soja colaborou com 14% das exportações do país, sendo a mercadoria com maior importância nas exportações brasileiras.

Tabela 1. Balanço da oferta e demanda de soja, no Brasil, em mil t.

	Safra	Soja em grão	Farelo	Óleo
Produção	2020/21	137.322,6	36.865,7	9.749,2
	2021/22	140.499,6	37.271,8	9.855,2
Importação	2020/21	863,7	4,3	107,1
	2021/22	500,0	0,9	53,2
Suprimento	2020/21	142.407,1	38.343,1	10.271,1
	2021/22	145.565,0	40.500,2	10.032,5
Consumo	2020/21	51.734,1	17.905,4	8.496,0
	2021/22	52.374,3	18.507,2	8.122,0
Exportação	2020/21	86.107,6	17.210,2	1.650,9
	2021/22	89.311,7	17.800,0	1.636,0

As importações de soja em grãos, para o ano de 2021, totalizaram 864 mil toneladas e as exportações em 86,10 milhões de toneladas, segundo a estimativa feita pelo Sistema de Comércio Exterior (Siscomex) (CONAB, 2022).

Na produção de soja, uma das etapas considerada mais importante é a aquisição de sementes de alta qualidade, no entanto, inúmeros fatores influenciam essa variável, como por exemplo, o manejo da fertilidade do solo. Para seu bom desenvolvimento, além do carbono, oxigênio e hidrogênio, a planta necessita de nutrientes provenientes do solo, tais como, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Mn, Zn, Mo e Co ou oriundos da fertilização mineral.

A qualidade das sementes, foco de todas as fases de um programa de produção de semente, engloba todo conjunto de atributos necessários para um bom estabelecimento do estande da cultura. Para cada espécie, padrões mínimos de qualidade são estabelecidos para que a semente possa ser comercializada.

Sementes de soja de alta qualidade devem possuir altas taxas de germinação, sanidade e vigor, além da garantia de pureza física e genética, sem a presença de sementes de plantas daninhas. Vários fatores são responsáveis por prejudicar a qualidade fisiológica destas, como a deterioração em campo envolvendo danos por percevejo, umidade e mecânicos, causados pelas colhedoras (KRZYZANOWSKI *et al.*, 2018).

Para analisar o potencial fisiológico de um lote de sementes, ou seja, seu êxito em expressar funções vitais perante condições ambientais adversas, são realizadas avaliações rotineiras em laboratório seguindo instruções das Regras para Análise de Sementes, editada pelo Brasil (MAPA, 2009) e outras organizações como

“International Seed Testing Association (ISTA, 2011) e “Association of Official Seed Analysts (AOSA, 2002) (KRZYZANOWSKI *et al.*, 2020).

2.2 BORO NA PLANTA

Os trabalhos de Agulhon (1910) e Maze (1915) estão entre os primeiros relatos dos efeitos benéficos do boro (B) no crescimento de várias espécies vegetais como colza (*Brassica napus* L.), aveia (*Avena sativa* L.), milho (*Zea mays* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.). Porém, a sua essencialidade foi demonstrada por Warrington (1923), mesmo antes de Arnon e Stout (1939) terem estabelecido os critérios de essencialidade, em estudos com fava (*Vicia faba* L.), observando-se a morte das plantas quando o B não foi adicionado à solução nutritiva. Embora, nesse estudo não tenha sido comprovado o envolvimento direto do B no metabolismo da planta ou que seu papel não pudesse ser desempenhado por outro elemento.

Desde então, inúmeros trabalhos vêm confirmando a essencialidade do B, enfatizando o seu efeito nos aspectos fisiológicos e nas funções biológicas das plantas como: transporte de açúcares, síntese da parede celular, lignificação, estrutura da parede celular, metabolismo dos carboidratos, respiração, fotossíntese, conteúdo de clorofila, metabolismo do ácido indol acético (AIA), metabolismo de compostos fenólicos, desenvolvimento de raízes laterais, absorção de íons (BROWN; SHELP, 1997; BROWN *et al.*, 2002; MARSCHNER, 2012; GRATTAN *et al.*, 2015; SHIREEN *et al.*, 2018). Dentre essas funções, destaca-se a manutenção da estabilidade e integridade da parede celular. A capacidade do B de formar complexos diéster com açúcares que contêm uma configuração cis-diol (Figura 2) permite ligações entre as subunidades de carboidratos dos polissacarídeos da parede celular, principalmente com o ramnogalacturonan II (RG-II), um dos polissacarídeos pécticos predominantes na parede celular de gimnospermas e angiospermas, com formação de um dímero que é covalentemente reticulado por um diéster de borato, conferindo resistência à tração e porosidade à parede celular (O'Neill, 2004).

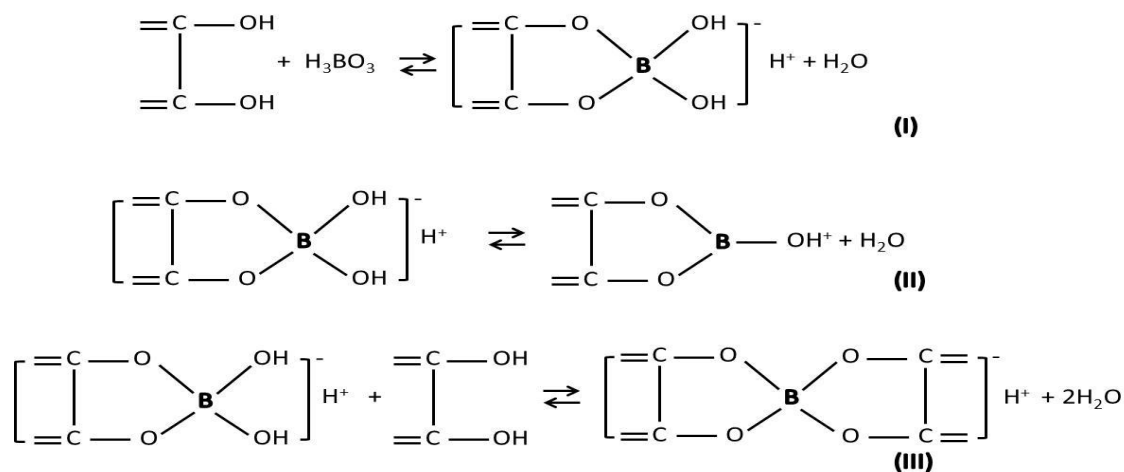


Figura 2. Reações entre polióis e ácido bórico envolvidas na síntese de complexos de borato com compostos contendo grupos cis-hidroxila (BÖSEKEN, 1949).

Todas essas ligações, além da manutenção da estrutura da matriz da parede celular, proporcionam uma estreita associação com a membrana plasmática. Isso permite a expansão celular ordenada, liberação regulada de íons de hidrogênio na parede celular, retenção de cálcio e controle sobre a formação de lignina quando a expansão celular é concluída. Se o B não estiver disponível, esses processos não ocorrem ou se tornam descoordenados. O alongamento celular normal e a diferenciação da parede também são interrompidos.

Sob condições de insuficiência de B ocorrem alterações na estrutura do carbono orgânico das paredes celulares, não apenas nas ligações entre esses compostos, mas também na quantidade, com aumento no conteúdo de aminoácidos, celulose, fenóis e lignina, promovendo o inchaço e o enfraquecimento da integridade estrutural da parede celular, considerado uma das principais razões da interrupção do crescimento e alargamento de ápices meristemáticos como observado em raízes de citros (WU *et al.*, 2017). Esta parece ser a função primária do boro e a maioria dos outros sintomas de deficiência são, provavelmente, efeitos indiretos do rompimento do sistema de membrana plasmática e parede celular (HULL, 2002).

A concentração ótima de B aumenta a hiperpolarização da membrana plasmática, enquanto a deficiência de B altera o potencial de membrana e reduz a atividade da H⁺-ATPase (GOLDBACH; WIMMER, 2007). O efeito direto de B na ATPase de bombeamento de prótons ligado à membrana plasmática influencia o fluxo de íons. Assim, B influencia a disponibilidade e absorção pelas plantas de outros nutrientes. Um aparente aumento na absorção e translocação de P, N, K, Zn, Fe e Cu

nas folhas, brotos e sementes foi observado após a aplicação de B no algodoeiro (*Gossypium herbaceum* L.) (AHMED *et al.*, 2011).

A redução da taxa fotossintética também está associada à desestabilização da membrana ocasionada pela deficiência de B. Goldbach e Wimmer (2007) sugeriram ser a ruptura nas membranas do cloroplasto, gradiente de energia através da membrana e transporte de elétrons nos tilacóides a principal razão para essa redução.

Inúmeros trabalhos ressaltam a importância do B para um adequado funcionamento do metabolismo vegetal, porém ainda surgem questionamentos sobre a essencialidade do elemento para as plantas como o artigo provocativo de Lewis (2019). Esse autor não só questiona a essencialidade do B, mas ainda afirma ser na verdade um elemento tóxico às plantas. Apesar de ainda provocar polêmicas, muito se tem avançado no conhecimento não apenas nos aspectos relacionados ao funcionamento nas plantas, mas também nos mecanismos de absorção e transporte para os diversos tecidos vegetais.

Um dos mecanismos mais aceitos de como as plantas absorvem B da solução do solo é a difusão passiva, uma vez que a molécula de ácido bórico não apresenta carga e tem alta permeabilidade através da bicamada lipídica da membrana plasmática das células vegetais (HU; BROWN, 1997). Porém, foram observadas drásticas diferenças, mais de seis vezes, na quantidade de B absorvido entre cultivares de cevada e trigo, cultivadas em condições idênticas (NABEL, 1988). Tais observações levantaram dúvidas sobre ser este o único mecanismo atuando nesse processo.

Estudos com bicamadas lipídicas artificiais e mutantes de *Arabidopsis thaliana* diferindo na composição lipídica (percentual de esterois e comprimento de cadeia de ácidos graxos) relatam que a composição lipídica, assim como o pH, que reduziu em três ordens de magnitude a quantidade de B absorvido à medida que o pH aumentava de 6 para 10, podem interferir na permeabilidade do ácido bórico através da bicamada. Porém, tais resultados não permitiram afirmar que as discrepâncias nas quantidades de B absorvido verificado entre as cultivares podem ser totalmente atribuídas às diferentes composições lipídicas (DORDAS; BROWN, 2000).

Até o momento, três vias ou mecanismos são reconhecidos para a absorção e transporte de B em plantas (Figura 3): difusão passiva através da

membrana plasmática; transporte facilitado através de proteínas de canal, como as proteínas intrínsecas do tipo nodulina 26 (NIPs) com atuação no influxo do B da solução do solo ou apoplasto para o interior da célula; e transporte ativo de alta afinidade realizado por transportadores de ácido bórico e borato (BOR) ativados sobe baixa disponibilidade de B e com ação de efluxo de B do citosol para o apoplasto e carregamento do xilema (SHIREEN *et al.*, 2018).

Essas proteínas, que atuam como transportadores de B, podem ser expressas de maneira diferente nos vários genótipos, contribuindo não apenas na variação da quantidade de B absorvido da solução do solo, mas também no transporte para os diferentes tecidos das plantas. A atividade das proteínas transportadoras de B deve ser rigidamente regulada, auxiliando a manutenção de uma taxa de transporte radial dentro de uma faixa ótima para o funcionamento adequado do metabolismo vegetal, independentemente da concentração de B na solução do solo, evitando tanto o excesso como a toxidez (TAKANO *et al.*, 2008).

Na maioria das espécies de plantas a mobilidade do B é restrita no floema e sua distribuição na parte aérea segue o fluxo transpiratório. No entanto, em espécies que produzem quantidades significativas de polióis (álcool de açúcar), como manitol e sorbitol, o B é facilmente translocado como consequência da formação de complexos B-poliol (BROWN, 1997). Bellaloui *et al.* (1999) observaram aumento da translocação de B para tecidos jovens em plantas de tabaco com síntese de sorbitol aumentada através da técnica da transgenia, em relação às plantas não transformadas. Assim, espécies de plantas que não produzem quantidades significativas de polióis o B é imóvel no floema ou apenas ligeiramente móvel. Blevins e Lukaszewski (1998) encontraram na soja uma grande quantidade de pinitol na seiva do floema, porém, por tratar-se de um poliol cíclico a formação de um complexo com B é pouco provável, não contribuindo significativamente para a mobilidade do nutriente.

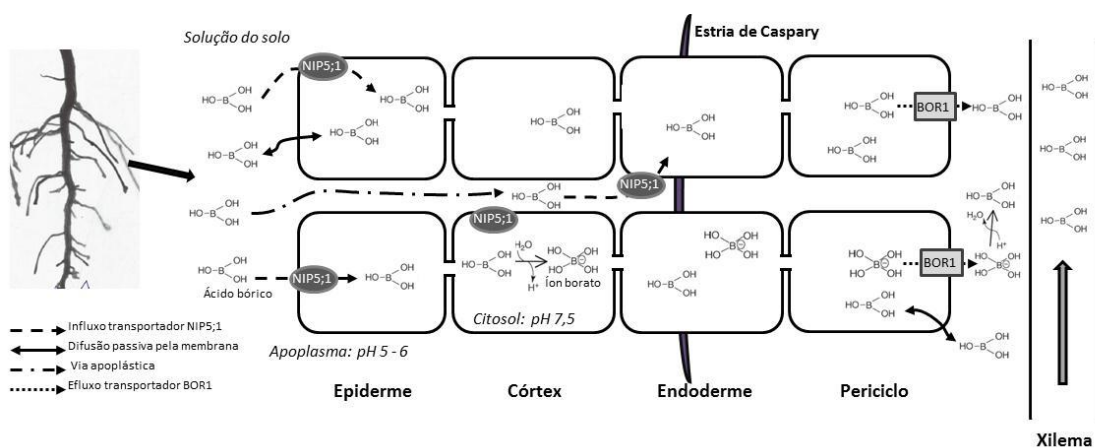


Figura 3. Diagrama mostrando o transporte radial do ácido bórico a partir da solução do solo, passando através da membrana plasmática para o citosol das células da raiz por difusão passiva ou com o auxílio do transportador NIP5;1, seguindo o gradiente de concentração. O transportador BOR1 exporta ácido bórico ou borato convertido a partir de ácido bórico no citosol da planta, onde o pH é maior do que no apoplasma, sendo então carregado no xilema. O citoplasma é conectado por plasmodesmos entre as células. A via simplástica refere-se ao fluxo de célula para célula. A via apoplástica refere-se à via extracelular fornecida pela matriz contínua das paredes celulares (redesenhado de Takano *et al.*, 2008).

Nas espécies consideradas com baixa mobilidade do B, como a soja, os primeiros efeitos visuais da deficiência podem ser observados em folhas jovens e tecidos meristemáticos, enquanto os sintomas de toxicidade são visíveis principalmente em folhas mais velhas, especialmente nas pontas das folhas onde o fluxo de transpiração termina (POSS *et al.*, 1999). Já nas espécies com mobilidade no floema, como *Prunus*, *Malus* e *Pyrus* (HU *et al.*, 1997), os sintomas de deficiência se manifestam inicialmente nas folhas mais velhas e a toxicidade nos drenos em desenvolvimento como frutos, gemas e câmbio vascular (BROWN; HU, 1996).

O suprimento insuficiente de B causa inúmeras alterações bioquímicas, fisiológicas e anatômicas nas plantas o que dificulta a distinção entre os efeitos primários e secundários da privação. A ampla variedade de sintomas de deficiência de B inclui crescimento atrofiado das raízes, crescimento restrito do meristema apical, folhas grossas, enroladas e quebradiças com expansão foliar reduzida; distância internodal curta, resultando em uma aparência de planta compacta, conteúdo reduzido de clorofila, diminuição da capacidade fotossintética e o transporte de produtos fotossintéticos, interrupção no transporte de íons, aumento do conteúdo de aminoácidos, celulose, fenóis e lignina na parede celular, diminui a fertilidade masculina, reduzindo a microsporogênese, germinação e alongamento do tubo

polínico e redução do rendimento das culturas. Após a fertilização, o distúrbio nutricional afeta a embriogênese, resultando na deterioração da semente ou na formação de embriões incompletos ou danificados (BROWN *et al.*, 2002; WANG *et al.*, 2015; BRDAR-JOKANOVI'Ć, 2020). Plantas com sintoma de deficiência apresentam lamela média de espessura muito reduzida, com menor intensidade de coloração, o que reflete a insuficiência de pectato de cálcio, composto responsável pela adesão entre as células e cuja síntese é bloqueada pelo B (MORAES *et al.*, 2002).

Os sintomas de toxicidade são semelhantes aos de deficiência, prevalecendo manchas necróticas nas folhas, redução da concentração de clorofila, da fixação de CO₂, área foliar e crescimento da planta como um todo incluindo o sistema radicular (NABLE, 1988; BRDAR-JOKANOVI'Ć, 2020). O excesso de B acarreta folhas manchadas de verde e amarelo e, em casos graves, ocorre queima dos bordos foliares. Os sintomas de toxidez são observados quando o nível nas folhas diagnóstico é superior à 100 mg kg⁻¹ (FAGERIA *et al.*, 1997).

2.3 BORO NO SOLO

No ambiente o B está amplamente distribuído em pequenas quantidades, tanto na hidrosfera quanto na litosfera. Nos solos agricultáveis a concentração total de B geralmente encontra-se na faixa de 5 a 30 mg kg⁻¹. Entre as principais fontes estão o mineral borosilicato turmalina, com liberação após processo de degradação, emanções vulcânicas, águas subterrâneas e água do mar, que contém aproximadamente 4,6 mg L⁻¹ (BRBAR-JOKANOVI'Ć, 2020).

O total de B do solo está dividido em cinco frações: prontamente solúvel, adsorvido especificamente, ligado a óxidos, ligado organicamente e B residual, com diferentes graus de biodisponibilidade para as plantas. Quando presente na solução ou fracamente adsorvido nas partículas do solo o B está mais disponível para absorção pelas plantas e corresponde de 1 a 2% do total presente no solo (prontamente solúvel) (HAVLIN *et al.*, 2012). Considera-se também disponível, embora com maior dificuldade para absorção pelas plantas, o B adsorvido em superfícies argilosas ou associado à matéria orgânica (MO) do solo (adsorvido especificamente). As frações indisponíveis são o B ligado a óxidos, ligado organicamente e o denominado residual, que está associado a minerais primários e

secundários dentro da estrutura cristalina, que provavelmente não será liberado a médio e longo prazo nas condições normalmente encontradas em solos nativos e representa de 87 a 99% do total de B do solo (PADBHUSHAN; KUMAR, 2017). As diferentes frações do B no solo podem ser alteradas pela ação das propriedades físico-químicas do solo como pH, matéria orgânica do solo (MOS), minerais de argila, óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), carbonato, além de outros fatores como o clima e as práticas de manejo o que, conseqüentemente, alteram a sua disponibilidade na solução do solo (YERMIYAHU *et al.*, 1995; PADBHUSHAN; KUMAR, 2017).

A faixa que define a deficiência e a toxidez do B em plantas é extremamente estreita, mais do que para a maioria dos nutrientes (MALAVOLTA, 2006; BRBAR-JOKANOVI'Ć, 2020). Abreu *et al.* (2005) propuseram a seguinte classificação: 0,0–0,2 mg kg⁻¹ como baixa, 0,21–0,6 mg kg⁻¹ média, 0,61–1,1 mg kg⁻¹ bom, 1,2–3,0 mg kg⁻¹ alta e >3,0 mg kg⁻¹ muito alto, sendo considerada como concentrações tóxicas de B disponível no solo, enquanto para Alvarez Venegas *et al.* (1999) os valores são: ≤ 0,15 como muito baixo, 0,16–0,35 mg kg⁻¹ como baixa, 0,36–0,6 mg kg⁻¹ média, 0,61–0,9 mg kg⁻¹ bom e > 0,9 muito alta. De uma forma mais generalizada, considera-se que de 0,6-1,0 mg kg⁻¹ representa a faixa ideal de B do solo, enquanto valores mais baixos e mais altos indicam deficiência e toxicidade (SUN *et al.*, 2019). Essas diferenças muitas vezes são em decorrência do tipo de solo e dos extratores utilizados (MOREIRA *et al.*, 2011), visto a capacidade distinta de extração e interpretação

As formas químicas predominantes do B presentes na solução do solo são o ácido bórico (H₃BO₃) e o ânion borato [B(OH)₄⁻] (Pereira *et al.*, 2021). Em solução aquosa o equilíbrio entre essas duas formas é fortemente dependente do pH (KLOCHKO *et al.*, 2006). A constante de ionização (pK_a) do H₃BO₃, característica físico-química definida como o pH de uma solução onde a concentração das espécies não dissociadas é igual à das espécies ionizadas, é pequena, pK_a igual a 9,25. Assim, em soluções com pH menor que pK_a há maior concentração de H₃BO₃ e em pH mais alto a forma B(OH)₄⁻ predomina. Como na maioria dos solos o pH está abaixo de 9,25 o H₃BO₃ é a forma predominante e, portanto, a forma mais absorvida pelas plantas (TANAKA; FUJIWARA, 2008; PEREIRA *et al.*, 2021). No entanto, esta forma neutra é quimicamente adsorvida com menor intensidade aos componentes sólidos do solo comparado à sua forma aniônica (B(OH)₄⁻), o que a torna passível de lixiviação,

principalmente em solos arenosos e locais de precipitação elevada e pode levar à deficiência para as plantas (ROSOLEM; BÍSCARO, 2007; OLIVEIRA NETO *et al.*, 2009).

Algumas regiões do mundo com essas características apresentam limitações na disponibilidade do B para as plantas e incluem países como Japão, China, EUA e Brasil. O oposto ocorre nas regiões áridas e semiáridas onde águas subterrâneas com alto teor de B atingem a superfície do solo por ação capilar e evaporam, deixando a concentração em um nível tóxico para as plantas. É o que acontece em regiões da Austrália, Egito, Iraque, Jordânia, Líbia, Marrocos, Síria, Turquia, Califórnia e Chile. A disponibilidade sazonal de água também afeta o fornecimento de B para as raízes das plantas, pois em estações secas o fluxo de massa é reduzido e o contato do nutriente com a raiz, no caso do B, se dá por fluxo de massa (TANAKA; FUJIWARA, 2008).

2.4 IMPORTÂNCIA DOS TESTES DE QUALIDADE DE SEMENTES

A qualidade das sementes é um quesito muito importante que deve ser conhecido pelo agricultor devido ao aumento das exigências do mercado consumidor por produtos de alta qualidade. Sementes de alta qualidade minimizam os prejuízos que podem ser causados pela utilização de sementes de baixa qualidade como desuniformidade da lavoura, falhas, redução da produtividade, ressemeadura, emergência e estabelecimento (BAUMGRATZ; SILVA, 2019).

Antes de serem levadas a campo, as sementes passam por um controle de qualidade realizado em laboratórios de análises de sementes. Testes de germinação, vigor, desempenho de plântulas e testes rápidos, são realizados para avaliar seu desempenho fisiológico gerando uma certificação que atesta sua pureza e alto vigor (PITTELKOW; PASQUALLI, 2014).

O vigor das sementes trata-se de uma soma de atributos que determinam o potencial de atividade e desempenho da semente durante a germinação e emergência após a sementeira (MARCOS FILHO, 2015a). É uma das principais características de sementes de alta qualidade (PANOZZO *et al.*, 2009), sendo um aspecto primordial para a implantação da cultura.

O alto vigor dessas sementes faz com que, mesmo em determinadas situações, esta não perca consideravelmente seu desempenho fisiológico quando

comparadas com sementes de baixo ou médio vigor (FRANÇA-NETO; KRZYZANOWSKI, 2018b).

Com a grande demanda por sementes de alta qualidade, aumentou-se a preocupação com o seu real potencial fisiológico, o que despertou a criação de testes de vigor. Estes testes avaliam, de uma forma mais significativa que o teste de germinação, as bases bioquímicas e fisiológicas do potencial de desempenho de um lote de sementes, de forma direta ou indireta (MARCOS FILHO, 2015a).

A alta qualidade das sementes pode proporcionar seu melhor desempenho em campo, possibilitando vantagens no aproveitamento de nutrientes, água e luminosidade (HENNING *et al.*, 2018). Em grandes culturas, vários testes são colocados em prática, como o de tetrazólio, envelhecimento acelerado e protrusão de raiz primária, juntamente com a avaliação computadorizada de imagens de plântulas. (FRANÇA-NETO; KRZYZANOWSKI, 2018b).

2.4.1 Teste de Germinação

O teste de germinação é um teste obrigatório realizado nas sementes para que essas possam ser comercializadas. Tem como objetivo avaliar o potencial máximo de germinação de um lote de sementes, determinando a porcentagem de plântulas emergidas, estimando assim o valor para semeadura em campo (MAPA, 2009).

As sementes são distribuídas em papel 'Germitest' e submetidas a condições ideais de temperatura, luz e umidade por cinco dias, para que possam expressar seu melhor desempenho.

2.4.2 Protrusão de raízes primárias

Para o programa de qualidade de sementes de soja, apesar de não exibir uma metodologia padronizada para várias culturas, o teste de protrusão de raiz primária é considerado mais um teste para a avaliação de vigor das sementes, visando grande eficiência em um curto período (GOMES *et al.*, 2018).

O comitê da ISTA autorizou a introdução do teste de protrusão de raiz primária como método adicional de avaliação do vigor de sementes de milho (ISTA, 2011), já que relaciona o número de sementes que emitem a raiz primária com a velocidade de germinação (TOLEDO *et al.*, 1999).

Partindo do preceito da primeira contagem de germinação, que avalia indiretamente o vigor através da velocidade de germinação e da percentagem de plântulas normais obtidas por ocasião do teste de germinação na amostra em análise (NAKAGAWA, 1999), realiza-se o teste da precocidade da emissão da raiz primária (GOMES *et al.*, 2018).

2.4.3 Envelhecimento acelerado

McDonald e Phannendranath (1978) desenvolveram a metodologia do teste de envelhecimento acelerado que vem sendo recomendada até hoje, com aperfeiçoamento de alguns pesquisadores. O resultado do teste é influenciado por vários aspectos como teor de água inicial e tamanho da semente, temperatura e período de permanência das amostras no interior da câmara, tratamento químico, genótipo, tamanho da amostra e sua distribuição sobre a tela metálica no interior do gerbox, forma utilizada para conter as amostras durante o teste e provável abertura da câmara de envelhecimento acelerado (MARCOS-FILHO, 2015b).

São utilizadas caixas de plástico com dimensões de 11×11×3,5 cm, com uma superfície de tela de alumínio em seu interior, onde as sementes ficam dispostas formando uma camada única. O fundo da caixa é preenchido com 40 mL de água para aproximar a umidade relativa a 100%, e estas são tampadas e levadas a câmaras jaquetadas ou incubadoras preferencialmente a 41 °C, permanecendo, para soja, 72 horas segundo AOSA (2002) e 48 horas segundo Marcos Filho *et al.* (1990), diferindo no valor percentual de água na semente no final do processo.

O teste expõe as sementes a alta temperatura e umidade excessiva, para depois serem colocadas para germinar em condições que seriam ideais para esse processo (MARCOS FILHO, 1999). A temperatura máxima de 41 °C é justificada pelo fato de proteínas hidratadas se desnaturarem a temperaturas superiores, o que causaria inativação metabólica (MARCOS FILHO, 2015b).

Para menor interferência dos fatores, a gestão do teste deve ser seguida e controlada com muita cautela, havendo uma tolerância de no máximo 15 minutos no período de envelhecimento, cumprindo o horário e período para instalação e contagem do teste de germinação pós-envelhecimento (MARCOS FILHO, 2015b). Segundo TeKrony (2003), alternâncias de 0,5 °C na temperatura da câmara de envelhecimento acelerado já podem modificar significativamente o resultado do teste.

Sementes de baixo vigor, após serem submetidas ao teste, demonstram um potencial de viabilidade bem menor quando comparadas com sementes de alto vigor, que possuem uma capacidade maior de germinação e produção de plântulas normais (MARCOS-FILHO, 2015a).

2.4.4 Teor de lignina

A lignina, polímero fenológico que proporciona resistência mecânica, defesa de plantas lenhosas e possibilita o transporte de água no interior das plantas, é um importante indicador de qualidade física e fisiológica de sementes de soja (GLORIA; CAMELLO-GUERREIRO, 2006). É considerada uma complexa macromolécula polifenólica, e o segundo polímero mais abundante na natureza, após a celulose (POLLI *et al.*, 1994).

Na parede celular das células, se encontra como o terceiro maior componente (BUTLER; BAILEY, 1973), representando de 60 a 90% (EGG MENDONÇA, 2001), sendo formada pela ligação covalente entre monolignóis (álcoois fenilpropanílicos). Age protegendo os polissacarídeos da parede celular, proporcionando resistência a decomposição (VANHOLME *et al.*, 2010).

É impermeável a água, pouco elástica, resistente à pressão, e proporciona integridade as células vegetais, o que garante uma sustentação do corpo da planta (BOERJAN *et al.*, 2003). Sua biossíntese auxilia a planta em situações de estresses abióticos, bióticos, metabólico e perturbações na parede celular (TRONCHET *et al.*, 2010).

De acordo com a avaliação feita por Huth *et al.* (2016), um alto teor de lignina no revestimento das sementes proporciona uma maior resistência a danos provocados por intemperismo e estresse oxidativo. França Neto *et al.* (2016) notou que esse teor elevado também proporcionaria condições desfavoráveis ao deterioramento das sementes pelo efeito das flutuações de umidade do ambiente sobre elas. Na determinação, quanto maior o seu teor no tegumento, mais resistência a impactos mecânicos será conferido à semente (ALVAREZ *et al.*, 1997).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCAL DO EXPERIMENTO, TRATAMENTOS E DELINEAMENTO

O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação na Embrapa Soja localizada em Londrina, estado do Paraná, na latitude 23°11'37" S, longitude 51°11'03" O e altitude de 630 metros. O clima em Londrina é descrito, segundo a classificação climática de Köppen como Cfa (clima subtropical úmido), com verões quentes e geadas pouco frequentes (Wrege et al., 2011; Alvares et al., 2014; Nitsche et al., 2019). O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho Distrófico coletado em área de mata nativa no município de Ponta Grossa, Estado do Paraná com os seguintes atributos químicos (EMBRAPA, 1997): pH (CaCl₂) = 4,2, MOS = 38,1 g kg⁻¹, P = 7,1 mg kg⁻¹ (Mehlich 1), K⁺ = 0,3 cmol_c kg⁻¹, Ca²⁺ = 2,8 cmol_c kg⁻¹, Mg²⁺ = 1,2 cmol_c kg⁻¹, Al³⁺ = 0,9 cmol_c kg⁻¹, H+Al = 8,3 cmol_c kg⁻¹, CTC = 12,7 cmol_c kg⁻¹, S-SO₄²⁻ = 4,0 mg kg⁻¹, B = 0,3 mg kg⁻¹, Cu = 1,4 mg kg⁻¹, Fe = 221,6 mg kg⁻¹, Mn = 29,2 mg kg⁻¹, Zn = 1,1 mg kg⁻¹, areia = 38 g kg⁻¹ e argila = 510 g kg⁻¹.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 × 5, com duas fontes de boro [ácido bórico (18% de B) e ulexita (12% de B)], aplicadas em 5 doses (0, 2, 4, 8 e 16 mg kg⁻¹), com quatro repetições. A cultivar de soja utilizada foi a BRS 1003 IPRO de crescimento indeterminado cultivada em vasos de barro de 3 L de capacidade.

A colheita das vagens foi realizada manualmente, em abril de 2021, havendo a separação da parte aérea para pesagem da massa seca. Foi realizada a debulha, também manualmente, para a contagem e peso dos grãos.

O grau de umidade das sementes foi determinado a partir do método da estufa, de acordo com as Regras de Análise de sementes (BRASIL, 2009). As mesmas foram colocadas em cápsulas de peso conhecido, pesadas e levadas para a estufa por 24 horas. No dia seguinte, eram pesadas novamente e o valor obtido pela fórmula $[(P.I - P.F) / (P.I - TARA)] * 100$, era justamente o teor de umidade referente àquela amostra, onde: P.I = peso inicial; P.F = peso final; TARA = peso da cápsula. O teor de umidade para a amostra ficou em torno de 9,7.

3.2 ANÁLISES REALIZADAS

3.2.1 Teste de Germinação

A partir dos critérios descritos nas Regras para Análise de Sementes

(MAPA, 2009), realizou-se o teste de germinação. Utilizaram-se 4 subamostras de 50 sementes para cada repetição, distribuídas com ajuda de um tabuleiro, em papel 'Germitest' umedecido com água deionizada (2,5 vezes seu peso).

Após a montagem, com duas folhas de papéis embaixo e uma em cima, as amostras foram enroladas e presas com elástico de borracha nas extremidades e acondicionadas em caixas plásticas esterilizadas com álcool 70%, as quais permaneceram por cinco dias em gabinetes a temperatura ambiente controlada (25 °C) e iluminação fluorescente constante.

Após cinco dias da implantação do teste, foi efetuada a contagem da emergência de plântulas. Para o percentual médio de germinação, os valores de plântulas normais das quatro subamostras foram somados e dividido por dois.

3.2.2 Comprimento de Plântula

Para o desenvolvimento do teste de comprimento de plântula, 20 sementes de soja foram colocadas em papel 'Germitest', umedecido com água deionizada com 2,5 vezes seu peso, dispostas de forma orientada com a micrópila voltada para a parte inferior do papel, para favorecer o crescimento retilíneo da plântula.

Após a montagem de cinco subamostras, cada uma é enrolada e agrupada as demais com elástico de borracha na parte superior, sendo mantidas em saco plástico na vertical, por três dias, em um germinador a 25 °C com ausência de luminosidade. Passados três dias, foi realizada a medição do crescimento das plantas exatamente no mesmo horário da implantação dos testes.

3.2.3 Envelhecimento Acelerado

Segundo a metodologia descrita por Marcos Filho (1999), para o desenvolvimento do teste de envelhecimento acelerado, é necessário a presença de uma câmara 'jaquetada', onde as sementes são armazenadas, passando por um período de 48 horas de exposição ao envelhecimento, sob temperatura constante de 41 °C e alta umidade. O teste expõe as sementes a alta temperatura e umidade excessiva, para depois serem colocadas para germinar em condições que seriam ideais para esse processo.

As sementes são dispostas em uma caixa 'gerbox', sobre uma tela metálica formando uma camada única, tendo o fundo preenchido com 40 mL de água, e assim são levadas a câmara 'jaquetada'. Após 48 horas, as amostras são retiradas e colocadas em papel 'Germitest', umedecido com água deionizada com 2,5 vezes seu peso, para a realização do teste de germinação. Após esse teste, as sementes são avaliadas analisando o comportamento de cada uma em relação ao seu grau de deterioração.

3.2.4 Emissão de Raízes Primárias

No teste de emissão de raízes primárias, quatro subamostras de sementes foram dispostas em papel 'Germitest', umedecido com água 2,5 vezes seu peso, agrupadas e acondicionadas em caixas plásticas em gabinetes com temperatura controlada de 25 °C. Esse teste segue a mesma regra de montagem que para o teste de germinação, a diferença é que, ao invés de permanecerem por cinco dias nos gabinetes, no teste de emissão de raízes primárias as amostras ficaram armazenadas por 48 horas (dois dias), para assim serem avaliadas. As plântulas foram medidas uma a uma, com a ajuda de uma régua, para a análise de quais emitiram raízes primárias de no mínimo 2,0 cm.

3.2.5 Concentração de Lignina

Para determinar a concentração de lignina nas sementes, foi utilizado o método sugerido por Alvarez *et al.* (1997), onde as sementes permaneceram submersas em água, por aproximadamente 12 horas, em um becker de 50mL, e em seguida, o tegumento foi separado do cotilédone, e submetido a desidratação em estufa à temperatura de 105°C por 16 horas. Posteriormente o tegumento foi moído e passado em tamise. Então, 250 gramas do material com granulação de 60 mesh, foi transferido para um frasco de 250mL, adicionado 50mL de etanol 80% (p/v) e aquecido a 100°C sob refluxo por 10 minutos.

As amostras foram filtradas e o sedimento transferido para o frasco com adição de 100mL de água destilada deionizada, sendo aquecido sob refluxo por 10 minutos. Em seguida, as amostras foram filtradas e o sedimento movido para o frasco com 100mL de oxalato de amônio 0,5% (p/v), aquecido por duas horas sob

refluxo. Novamente as amostras foram filtradas e o sedimento levado para um frasco de vidro adicionando 100mL de ácido sulfúrico 1N e aquecido por duas horas sob refluxo.

Após serem filtradas em cadinho com vidro sinterizado, os resíduos foram lavados com 50mL de acetona e transferidos para um Becker, onde adicionou-se 20mL de ácido sulfúrico 72% (p/v), ficando em repouso por 12 horas. Após o tempo determinado, as amostras foram hidrolisadas e transferidas para frascos de 250mL com a adição de 100mL de água destilada deionizada, sendo aquecido por duas horas sob refluxo. Após este tratamento, os resíduos foram filtrados em cadinhos com vidro sinterizado sob vácuo e lavados com 200mL de água destilada e secados a 105°C por seis horas. A porcentagem de lignina das sementes foi determinada gravimetricamente.

3.2.6 Determinação do Teor de Boro e Nutrientes na Folha Diagnóstico

No estágio reprodutivo R2 (FEHR *et al.*, 1971) foram coletados o terceiro e quarto trifólio a partir do ápice (folha diagnóstico com pecíolo) de cada tratamento e secos em estufa de circulação forçada a 65°C para determinação dos teores totais de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn (MALAVOLTA *et al.*, 1997).

Para a determinação do teor de B nas folhas, foi utilizado o método descrito por Moller *et al.* (1997), onde 0,2g de amostra seca e finamente moída foi colocada em um cadinho de porcelana e levada para uma mufla a 550°C durante três horas. Após esfriar, 10 mL de HCl 0,1N são adicionados ao cadinho para dissolver as cinzas, sendo deixado para decantar.

Para a próxima etapa, é necessário preparar a solução tampão e a solução de azometina H 0,45%. Para a solução tampão, é necessário dissolver 500 g de acetato de amônio e 30 g de etileno di-amino tetra-acético sal de sódio em 500 ml de água deionizada, juntando e homogeneizando lentamente 250 ml de ácido acético glacial. Para a solução de azometina H 0,45% serão utilizados 0,45 ml de azometina H dissolvidos em 100 mL de uma solução de ácido ascórbico a 1%, sendo mantida em frasco escuro e em local refrigerado por no máximo uma semana.

Em um tubo de ensaio, foram transferidos 0,2 ml do sobrenadante presente no cadinho, adicionando-se 2 ml de solução tampão e 2 ml de solução de

azometina H 0,45%, sendo necessário agitar. A leitura do B é realizada após 30 minutos em espectrofotômetro, comprimento de onda 420nm e filtro correspondente.

3.2.7 Componentes de Produção

Durante todo ciclo vegetativo foram coletadas as folhas senescentes para obtenção da produção de matéria seca total da parte aérea da planta (MSPA). após o estágio de maturação fisiológica (R8) foram quantificadas a produção de grãos (PG), número de vagens por vaso (NVV) e número de grãos por vagem (NGV) e a relação NGV/NVV. Os componentes de produção (número de vagens por vaso, peso de 100 sementes, número de grãos por vagem, volume de raízes, produção grãos) foram analisados no final do ciclo da cultura.

3.2.8 Análise dos atributos químicos do solo

Para determinação dos atributos químicos do solo [pH, matéria orgânica (MO), P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, H+Al, Al³⁺, P-remanescente, capacidade de troca de cátions (CTC), B, Cu, Fe, Mn e Zn), conforme metodologias descritas pela Embrapa (1997).

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade dos resíduos de Shapiro-Wilk e de homogeneidade de variância (teste de Bartlett). Utilizamos a análise de variância (ANAVA), teste F e de acordo com cada variável os tratamentos significativos pela ANAVA foram comparados pelo teste t ou foi estabelecido modelo de regressão. Adicionalmente, a associação entre as variáveis foi quantificada pelo coeficiente de correlação linear de Pearson. Todos os testes foram realizados ao nível de significância de 5%.

4. RESULTADOS

Resultados foram divididos em dois artigos: Artigo A) Fontes e doses de boro na produção, componentes de produção, estado nutricional e alterações dos atributos químicos do solo cultivado com soja e Artigo B) Influência de doses de boro com diferentes fontes no sistema radicular e qualidade de sementes de soja

4.1 ARTIGO A

FONTES E DOSES DE BORO NA PRODUÇÃO, COMPONENTES DE PRODUÇÃO, ESTADO NUTRICIONAL E ALTERAÇÕES DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO CULTIVADO COM SOJA

Resumo: A carência de boro (B) tem sido um problema frequente na soja, visto que, independentemente da eficiência ou não no aproveitamento do elemento contido no solo, existe a sensibilidade das plantas em relação ao nutriente. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da aplicação de fontes e doses de B na produção, componentes de produção, estado nutricional e alterações dos atributos químicos do solo cultivado com soja. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial 2×5 com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos de duas fontes (ácido bórico e ulexita) e cinco doses de B (0, 2, 4, 8 e 16 mg kg^{-1}) e avaliados a produção de grãos (PG), os componentes de produção, estado nutricional e atributos químicos do solo. A produção de grãos (PG) foi maior com a aplicação de 4 mg kg^{-1} de B com efeito de toxidez nas doses 8 e 16 mg kg^{-1} na fonte H_3BO_3 . Apesar das maiores doses estimadas terem sido 0,93 e 185,0 mg kg^{-1} , as maiores PG situaram na faixa de 0,3 a 0,8 mg kg^{-1} no solo e 50 a 100 mg kg^{-1} na folha diagnóstico da soja. A aplicação de B aumentou os teores de nitrogênio, enxofre, ferro e B e diminuiu o fósforo e potássio na folha. Sua aplicação na forma de H_3BO_3 proporcionou maiores teores de B na folha e no solo cultivado com soja que a ulexita.

Palavras-chave: *Glycine max*, B foliar, B disponível, ácido bórico, ulexita

Abstract: Boron (B) deficiency has been a frequent problem in soybean, since, regardless of the efficiency or not in the use of the element contained in the soil, the plants are sensitive to the nutrient. The objective of this work was to evaluate the effects of the application of sources and doses of B on yield, yield components, nutritional status and changes in chemical attributes of soil cultivated with soybean. The experimental design used was completely randomized in a 2 × 5 factorial design with four replications. The treatments consisted of two sources (boric acid and ulexite) and five doses of B (0, 2, 4, 8 and 16 mg kg⁻¹) and evaluated grain yield (PG), yield components, nutritional status and chemical attributes of the soil. Grain yield (PG) was higher with the application of 4 mg kg⁻¹ of B with a toxic effect at doses 8 and 16 mg kg⁻¹ in the H₃BO₃ source. Although the highest estimated doses were 0.93 and 185.0 mg kg⁻¹, the highest PG ranged from 0.3 to 0.8 mg kg⁻¹ in the soil and 50 to 100 mg kg⁻¹ in the diagnostic sheet. of soy. The application of B increased the contents of nitrogen, sulfur, iron and B and decreased phosphorus and potassium in the leaf. Its application in the form of H₃BO₃ provided higher levels of B in the leaf and in the soil cultivated with soybean than ulexite.

Keywords: Glycine max, foliar B, available B, boric acid, ulexite

Introdução

Nos solos agricultáveis a concentração total de B encontra-se na faixa de 5 a 30 mg kg⁻¹. Entre as principais fontes estão o mineral borossilicato turmalina, com liberação após processo de degradação, emanações vulcânicas, águas subterrâneas e água do mar, que contém aproximadamente 4,6 mg L⁻¹ (BRBAR-JOKANOVI'Ć, 2020). A disponibilidade no solo ocorre preferencialmente na forma de ácido bórico (H₃BO₃) e é encontrado dessa forma no citoplasma (MARSCHNER, 2012). A absorção está relacionada com as reações de adsorção que o B possui com seus adsorventes existentes no solo, como os minerais de argila, carbonato de cálcio (CaCO₃), hidróxido de magnésio (MgOH), óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) e a matéria orgânica (MO), estando ligado com sua atividade e concentração na solução do solo (HAVLIN *et al.*, 2013).

O ácido bórico (H₃BO₃) e a ulexita (Na₂Ca₂B₁₀O₁₈·16H₂O), são alguns dos

principais produtos usados como fontes de B (MORTVEDT, 1991). O H_3BO_3 manifesta-se na forma de cristais e possui teor de B na faixa de 17-18%, é altamente solúvel em água e possui baixa reatividade com o solo (Byers, MIKKELSEN; COX 2001), enquanto a ulexita é um borato natural de sódio (Na) e cálcio (Ca), que se apresenta em forma granulada, e possui solubilidade dependente da proporção entre Na e Ca presentes no mineral. Apresenta teor de B em torno de 10-15% e de Ca de 12-14% (BYERS *et al.*, 2001).

Na planta, o teor de B considerado adequado para o desenvolvimento das culturas tem alta variação, pois está diretamente ligado à composição química das paredes celulares que difere entre as espécies (MARSCHNER, 2012). Malavolta *et al.* (1997) relatam que a faixa adequada de B nas folhas é de 21 e 55 $mg\ kg^{-1}$ para a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill), podendo ser encontrado valores de 5 a 100 $mg\ kg^{-1}$ para diferentes culturas (REUTER; ROBINSON, 1997).

A deficiência de B leva a alterações anatômicas, fisiológicas e químicas, sendo a maioria de efeitos secundários provindos da mesma (SHELP, 1993) e pode ser corrigida ou evitada, tanto por sua aplicação via solo como foliar (SHORROCKS, 1997), cuja eficiência é influenciada por vários fatores, como fontes utilizadas, tipo do solo, pH, solubilidade, efeito residual, mobilidade do nutriente e exigência da cultura (LOPES; SOUZA, 2001).

O elemento está relacionado com vários processos fisiológicos das plantas, como transporte de açúcar, síntese da parede celular, lignificação, estrutura da parede celular, respiração, metabolismo de carboidratos, metabolismo do ácido ribonucleico (RNA), metabolismo de ácido indolacético (AIA), metabolismo de compostos fenólicos, metabolismo de ascorbato, integridade da membrana plasmática e a fixação de nitrogênio (DECHEN; NACHTIGALL 2007; MARSCHNER, 2012). Power e Woods (1997) e Moraes *et al.* (2002) colocam como a principal função do B sua relação com às estruturas primárias da parede celular, voltado para a síntese de pectina, celulose e lignina.

Dependendo da cultivar e das condições ambientais, a toxidez manifesta-se em teores acima de 80 $mg\ kg^{-1}$ (MALAVOLTA *et al.*, 1997; FAGERIA *et al.*, 2003). Além disso, a ausência de B nas plantas pode levar a cessação do crescimento foliar e radicular, necrose do caule e folhas, redução da germinação do pólen e até mesmo levar a morte (OZTURK *et al.*, 2010). A exigência mais acentuada de B na fase

reprodutiva das culturas tem relação com sua necessidade para a formação de novos órgãos de reserva (CARVALHO; NAKAGAWA, 2000). A presença de deficiência do nutriente nessa etapa pode levar a formação de embriões incompletos ou danificados, aborto de sementes, e frutos deformados, pois compromete a microsporogênese, crescimento do tubo polínico e a embriogênese na pós-fertilização (LOUÉ, 2003; MARSCHNER, 2012).

O objetivo do presente trabalho foi identificar a dose ideal de ácido bórico e ulexita, como fonte de boro, para aumento da produtividade da soja cultivada sobre Latossolo Vermelho Distrófico.

Material e Métodos

Local do experimento

O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação na Embrapa Soja localizada em Londrina, estado do Paraná, na latitude 23°11'37" S, longitude 51°11'03" O e altitude de 630 metros. O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho Distrófico coletado em área de mata nativa no município de Ponta Grossa, Estado do Paraná com os seguintes atributos químicos (EMBRAPA, 1997): pH (CaCl₂) = 4,2, MOS = 38,1 g kg⁻¹, P = 7,1 mg kg⁻¹ (Mehlich 1), K⁺ = 0,3 cmol_c kg⁻¹, Ca²⁺ = 2,8 cmol_c kg⁻¹, Mg²⁺ = 1,2 cmol_c kg⁻¹, Al³⁺ = 0,9 cmol_c kg⁻¹, H+Al = 8,3 cmol_c kg⁻¹, CTC = 12,7 cmol_c kg⁻¹, S-SO₄²⁻ = 4,0 mg kg⁻¹, B = 0,3 mg kg⁻¹, Cu = 1,4 mg kg⁻¹, Fe = 221,6 mg kg⁻¹, Mn = 29,2 mg kg⁻¹, Zn = 1,1 mg kg⁻¹, areia = 38 g kg⁻¹ e argila = 510 g kg⁻¹.

Delineamento estatístico, adubação e plantio

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 × 5, com duas fontes de boro [ácido bórico (18% de B) e ulexita (12% de B)], aplicadas em cinco doses (0, 2, 4, 8 e 16 mg kg⁻¹), com quatro repetições. Trinta dias antes do plantio foi aplicado o equivalente a 5,0 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (MgO > 12%). As adubações com P, K, S, Co, Cu, Fe, Mn, molibdênio (Mo), níquel (Ni) e Zn foram feitas de acordo com MOREIRA *et al.* (2011) adaptadas de ALLEN *et al.* (1976) para experimentos conduzidos em condições de casa de vegetação [150 mg kg⁻¹ de P-fosfato monoamônio (MAP), 1,5 mg kg⁻¹ de Cu (CuSO₄·7H₂O), 0,1 mg kg⁻¹ de molibdênio - Mo (Na₂Mo₄·2H₂O), 2,5 mg kg⁻¹ de Fe

($\text{FeSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$ de cobalto - Co (CoCl_2), $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$ de níquel - Ni ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), $5,0 \text{ mg kg}^{-1}$ de Mn ($\text{MnSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e $5,0 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$]. O N foi suprido pela inoculação das sementes com um coquetel de *Bradyrhizobium elkanii* + *B. japonicum* e as doses B dentro de cada experimento. Nos estádios V2 e V4 foram feitas as adubações de cobertura parceladas duas vezes com 50 mg kg^{-1} de K (K_2SO_4), totalizando 100 mg kg^{-1} no ciclo.

Os vasos foram irrigados diariamente com água deionizada para manter o solo em umidade próxima a 70% do volume total de poros (VTP), havendo uma abertura no fundo de cada vaso, onde a água que escorria era devolvida ao sistema. Foram semeadas em cada vaso, dez sementes da cultivar BRS 1003 IPRO de ciclo indeterminado, e após o desbaste foram deixadas duas plantas uniformes por vaso de barro de 3 L de capacidade.

Colheita e análises laboratoriais

No estágio reprodutivo R2 (FEHR *et al.*, 1971) foram coletados o terceiro e quarto trifólio a partir do ápice (folha diagnóstico com pecíolo) de cada tratamento e secos em estufa de circulação forçada a 65°C para determinação dos teores totais de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn (MALAVOLTA *et al.*, 1997). Durante todo ciclo vegetativo foram coletadas as folhas senescentes para obtenção da produção de matéria seca total da parte aérea da planta (MSPA). Após o estágio de maturação fisiológica (R8) foram quantificadas a produção de grãos (PG), número de vagens por vaso (NVV) e número de grãos por vagem (NGV) e a relação NGV/NVV. Após a colheita, foram retiradas amostras de solo de cada vaso para determinação dos atributos químicos do solo [pH, matéria orgânica (MO), P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+Al , Al^{3+} , P-remanescente, capacidade de troca de cátions (CTC), B, Cu, Fe, Mn e Zn), conforme metodologias descritas pela EMBRAPA (1997).

Análise estatística

Os resultados dos atributos químicos do solo, componentes de produção, componentes fisiológicos e estado nutricional das plantas foram submetidos aos testes de normalidade dos resíduos de Shapiro-Wilk e de homogeneidade de variância (teste de Bartlett). Utilizamos a análise de variância (ANAVA), teste F e de acordo com cada variável os tratamentos significativos pela ANAVA foram comparados pelo teste

t ou foi estabelecido modelo de regressão. Adicionalmente, a associação entre as variáveis foi quantificada pelo coeficiente de correlação linear de Pearson. Todos os testes foram realizados ao nível de significância de 5%.

Resultados e Discussão

Sintomas visuais de toxidez de B na soja foram observados a partir da dose 8,0 mg kg⁻¹ de B somente com aplicação de H₃BO₃, cujo sintoma foi caracterizado pela queima das bordas das folhas novas e velhas, com posterior encarquilhamento e ausência de senescência, além disso, as plantas apresentaram menor porte (Figura 4). Com relação aos sintomas de deficiência, apesar dos teores de B no solo no tratamento controle (0,3 mg kg⁻¹) estarem bem abaixo do indicado como adequado (< 0,9 mg kg⁻¹, FAGERIA; STONE, 2008), não foram verificados sintomas visuais de carência do nutriente em todo ciclo de cultivo. Atividades específicas de componentes de membrana plasmática são influenciadas pelo B e os seu excesso são visíveis, principalmente em folhas mais velhas, especificamente nas pontas das folhas onde o fluxo de transpiração termina (POLLARD *et al.*, 1977; POSS *et al.*, 1999). Os sintomas de toxicidade são semelhantes aos de deficiência, prevalecendo manchas necróticas nas folhas, redução da concentração de clorofila, da fixação de CO₂, área foliar e crescimento da planta como um todo, incluindo o sistema radicular (NABLE, 1988; BRDAR-JOKANOVI'Ć, 2020)

O teor de B disponível no solo foi influenciado pelas fontes e doses de B (Figura 5) e verificou-se que as doses apresentaram efeito linear no incremento da disponibilidade no solo e a aplicação de H₃BO₃ proporcionou maiores teores do nutriente a partir da dose 4,0 mg kg⁻¹ que a ulexita. Esse aumento do teor de B no solo corrobora Pegoraro *et al.* (2008) e Moreira *et al.* (2010) ao reportarem efeito positivo da aplicação de doses de B no incremento do teor do nutriente em diferentes tipos de solo cultivado com soja. Contudo, exceto no tratamento controle, nas duas fontes os teores de B disponível, aproximadamente 50% das amostras situaram na faixa de 0,6 a 0,9 mg kg⁻¹ considerada adequada por Alvarez Venegas *et al.* (1991) com o extrator água quente. Esses valores ficaram próximos da dose máxima estimada (DME) de 0,93 mg kg⁻¹ para maior produção de grãos (PG) (Figura 6). A diferença dos teores de B das duas fontes nas maiores doses pode ser resultado da maior solubilidade do

H₃BO₃ em relação a ulexita, o que acarretou a maior disponibilização de razoáveis quantidades do nutriente, o que foi demonstrado pela análise de solo.

A MSPA, NVV e NGV foram incrementados pelas fontes e doses de B e houve interação fontes x doses (Tabela 2); contudo, a relação NGV/NVV não foi influenciada pelos dois fatores estudados. Plantas adequadamente nutridas em B têm maior desenvolvimento vegetativo com aumento na produção de MSPA, NVV e NGV, uma vez que o nutriente influencia diretamente a formação do tubo polínico, lamela média e fitohormônios, que estão diretamente relacionados (LOUÉ, 1993; MORAES et al., 2002; MARSCHNER, 2012). Além disso, a parte aérea das plantas funciona como estrutura de reserva, ocorrendo translocação e remobilização de fotoassimilados para o enchimento dos grãos (MALAVOLTA, 2006; MARSCHNER, 2012). Assim, maiores quantidades de MSPA, NVV e NGV, normalmente, se correlacionam positivamente com a PG, como observado na relação MSPA e PG ($\hat{y} = 14,032 + 0,492x$, $r = 0,89$; $p \leq 0,05$) e concorda com os resultados de Castro *et al.* (2006) e Moreira *et al.* (2010), que também verificaram aumento da produção de MSPA do girassol (*Helianthus annuus*) e da soja, respectivamente, em resposta à aplicação de B no solo.

O NVV aumentou de forma quadrática em razão da aplicação de B, independentemente da fonte utilizada (Tabela 2). Para Loué (1993) e Malavolta (2006), o suprimento insuficiente de B pode reduzir a formação do tubo polínico e, com isso, diminuir a produtividade de vagens e grãos. Além disso, um importante papel do B em assegurar alta produtividade da soja está no estabelecimento da capacidade do dreno reprodutivo, como número de vagens e grãos por planta e tamanho dos grãos (SORATTO *et al.*, 2010), o que também foi confirmado com o NVV que se correlacionou positivamente com a PG ($\hat{y} = 10,275 + 0,155x$, $r = 0,78$; $p \leq 0,05$). Ross et al. (2006) também obtiveram incremento no número de grãos por planta com aplicação de B, no entanto, fatores edafoclimáticos podem influenciar este resultado.

A massa de 100 grãos foi aumentada pela aplicação de doses de B, sendo também influenciada pelas fontes com interação fontes x doses (Tabela 2). Observou-se efeito linear para o H₃BO₃ e quadrático para a ulexita e na média das duas fontes o aumento foi até a dose de 8,0 mg kg⁻¹ de B. O B desempenha importante papel como transporte de açúcares, síntese da parede celular, lignificação, estrutura da parede celular, metabolismo dos carboidratos, respiração e fotossíntese (MARSCHNER, 2012; SHIREEN *et al.*, 2018). Assim, como a formação dos grãos

depende da constituição do tubo polínico e proteínas na planta, a massa dos grãos e a PG estão diretamente relacionadas com o suprimento de B (MALAVOLTA, 2006; MARSCHNER, 2012).

Nos atributos químicos do solo, somente os teores de $S-SO_4^{2-}$ disponível apresentou efeito das fontes e doses e interação fontes e doses e variaram de 2,0 a 5,0 $mg\ kg^{-1}$ no H_3BO_3 e de 2,2 a 4,0 $mg\ kg^{-1}$ na ulexita, com teor médio entre as fontes de 3,0 $mg\ kg^{-1}$ de $S-SO_4^{2-}$ (Tabela 3). Com a aplicação de doses elevadas de calcário e nutrientes nos vasos (MOREIRA et al., 2011) juntamente com a ausência de lixiviação e volatilização por conta do cultivo em vasos com coletores, os efeitos de interação entre os outros nutrientes analisados foram minimizado. A diminuição dos teores de $S-SO_4^{2-}$ no solo em função das doses indicam que o B aumentou a absorção de $S-SO_4^{2-}$ pelas plantas e concorda com Karthikeyan e Shukla (2008) e Nadian (2010), que ao estudarem a interação B e S, verificaram efeito sinérgico dos dois nutrientes no cultivo de mostarda (*Brassica juncea* L.), girassol e colza (*Brassica napus* L.), respectivamente.

Com relação aos teores foliares, a aplicação de fontes e doses de B apresentaram interações significativas para os teores de N, P, K, Ca e S, com efeito de fontes para os níveis de P, K, Ca, Mg, S, Cu e Fe e de doses para N, P, K e S (Tabela 4). As interações do B com N, P, K, Ca e S são descritas em Loué (1993), ao relatar que o incremento da concentração de B no solo e planta aumenta a absorção de N e S e reduz as P, K e Ca. Com relação ao efeito das fontes, a menor solubilidade da ulexita ocasionou nos menores teores dos nutrientes na planta. Para os teores foliares, as concentrações de N, P, K, S e Cu ficaram abaixo e os de Ca, Mg, Fe, Mn e Zn dentro das faixas de interpretação indicadas como adequadas por Malavolta et al. (1997) e Moreira e Moraes (2018) para folhas de soja.

Com relação aos teores foliares de B, houve efeito de fontes e resposta linear com o incremento das doses de B (Figura 5), que variaram de 50,0 a 359 $mg\ kg^{-1}$ no H_3BO_3 e de 39,6 a 274,5 $mg\ kg^{-1}$ na ulexita, com valores médios de 158,9 e 122,4 $mg\ kg^{-1}$ de B, o que representa uma diferença de 29,8% entre as duas fontes. Na média das fontes, a maior parte dos teores situaram na faixa de 50 a 100 $mg\ kg^{-1}$, bem abaixo do teor máximo estimado (TME) de 185 $mg\ kg^{-1}$ para a maior PG (Figura 6). Exceto o controle, os teores de B ficaram acima de 21 a 55 $mg\ kg^{-1}$ indicados como adequados por Fageria et al. (1997) para o cultivo da soja. Moreira et al. (2010), em três tipos de

solos, também obtiveram efeito linear da aplicação de B no solo no aumento do teor foliar na soja. Os teores de B disponível no solo e total na folha diagnóstico (Figura 5), independentemente da fonte boratada houveram correlações altamente significativas e positivas ($r = 0,98$, $p \leq 0,05$) o que corrobora os resultados de Pergoraro *et al.* (2008) e Moreira *et al.* (2011). Embora a correlação significativa tenha sido obtida, a equação forneceu capacidade preditiva relativamente pobre em relação a estimativa da PG como observado na Figura 6. Esses resultados ilustram a dificuldade de prever a partir dos teores de B na planta e disponível no solo a real potencialidade de PG de soja.

A aplicação de B não apresentou efeito de fontes, enquanto a dose $4,0 \text{ mg kg}^{-1}$ proporcionou a maior PG (Figura 7). Ross *et al.* (2006) também verificaram em quatro regiões aumento da PG de soja com o fornecimento de B. Houve incremento da PG com a aplicação de B, cujo aumento na média foi de 27,8% em relação ao tratamento controle, independentemente da fonte utilizada (Figura 4). Resultados semelhantes foram obtidos por Apurba *et al.* (2017) e Sutradhar *et al.* (2017), que observaram aumento significativo da PG de soja com incremento das doses de B. No entanto, Mascarenhas *et al.* (1988) relataram que a ocorrência de deficiência de B na soja nos trópicos influenciando a PG é baixa, o que concorda com Rosolem *et al.* (2008), que nas condições de "Cerrado" com solos altamente intemperizados não verificaram efeito das doses de B aplicado na forma de ulexita na produtividade de grãos. Existe uma relação entre a disponibilidade de B e a PG (Agarwala *et al.*, 1981) e além dos fatores edafoclimáticos, as diferenças de resposta verificadas são descritas por Gupta (1979) e Fageria (2008), ao reportarem que a eficiência de uso de nutrientes é um fator primordial na resposta das plantas, podendo existir materiais que são eficientes e responsivos (ER) ou não eficientes e responsivos para solos com baixo, médio ou alto teor de B disponível no solo.

Conclusões

Definir a relação entre o teor de B disponível no solo e na planta com aplicação de fontes com diferentes solubilidades pode ajudar a prever quando a cultura da soja responderá à aplicação de doses de B e quando o nível de toxicidade do nutriente pode ser esperado. Essa observação pode então ser usada para quantificar uma recomendação do fertilizante ou sinalizar condições de potencial toxidez ou deficiência

de B. Houve incremento dos teores de B disponível no solo e folha diagnóstico com o aumento das doses de B com os maiores teores na fonte H_3BO_3 em relação à ulexita. A produção máxima de grãos não apresentou efeito das fontes e foi obtida com a aplicação de $4,0 \text{ mg kg}^{-1}$, o que equivale a 4 kg ha^{-1} para aplicação em sistema plantio direto (SPD, amostragem de 10 cm de profundidade). Apesar do teor de B disponível no solo ter apresentado correlação significativa com o teor foliar, a equação forneceu capacidade preditiva relativamente baixa em relação a estimativa da PG.

Agradecimentos

À CAPES pelo apoio na realização do experimento, à equipe de Fertilidade do solo e Microbiologia pelo experimento realizado em Londrina (PR) e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- AGARWALA, S. C.; SHARMA, P. N.; CHATTERJEE, C.; SHARMA, C. P. Development and enzymatic changes during pollen development in boron deficient maize plants. **Journal Plant Nutrition**, v.3, p. 329–336, 1981.
- ALLEN, S. E.; TERMAN, G. L.; CLEMENTS, L. B. **Greenhouse techniques for soil-plant-fertilizer research**. Muscle Shoals, USA: National Fertilizer Development Center, 1976.
- ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H., eds. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa, MG, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, v. 5, p.25-32, 1999.
- SUTRADHAR, A. K.; KAISER, D. E.; BEHNKEN, L. M. Soybean response to broadcast application of boron, chlorine, manganese, and zinc. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 3, p. 1048-1059, 2017.
- BRDAR-JOKANOVI’C, M. Boron toxicity and deficiency in agricultural plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 4, p. 1424, 2020.
- BYERS, D. E.; MIKKELSEN, R. L.; COX, F. R. Greenhouse evaluation of for boron fertilizer materials. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, n. 4-5, p. 717–725, 2001.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Seeds: science, technology, and production** [Sementes: ciência, tecnologia e produção]. Jaboticabal, Brazil: FUNEP, 2000.

CASTRO, C.; MOREIRA, A.; OLIVEIRA, R. F.; DECHEN, A. R. Boron and water stress on yield of sunflower. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 2, p. 214–220, 2006.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elements required for plant nutrition [Elementos requeridos à nutrição de plantas]. In **Soil Fertility** [Fertilidade do Solo], eds. NOVAIS, R. F.; ALVAREZ VENEGAS, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Viçosa, Brazil: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 91-132, 2007.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Manual for Methods of Soil Analysis** [Manual de Métodos de Análise de Solo]. Rio de Janeiro, Brazil: Embrapa Solos, 1997.

FAGERIA, N. K. Optimizing nutrient use efficiency in crop production. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, p. 6–16, 2008.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Micronutrient deficiency problems in South America. In **Micronutrients deficiencies on global crop production**, ed. Alloway, B. J. London: Springer, p. 245-266, 2008.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and Mineral Nutrition of Field Crops**. Madison, USA: Marcel Dekker, 1997

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E.; BURMOOD, D. T.; PENNINGTON, J. S. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. **Crop Science**, v. 11, n. 6, p. 929–931, 1971.

GUPTA, U. C. Boron nutrition of crops. **Advances in Agronomy**, v. 31, p. 273–307, 1979.

HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil Fertility and Fertilizers: an introduction to nutrient management**. Upper Saddle River, USA: Pearson Education, 2013.

KARTHIKEYAN, K.; SHUKLA, L. M. Effect of boron-sulphur interaction on their uptake and quality parameters of mustard (*Brassica juncea* L.) and sunflower (*Helianthus annuus* L.). **Journal of the Indian Society of Soil Science**, v. 56, n. 2, p. 225–230, 2008.

LOPES, A. S.; SOUZA, E. C. A. Application philosophies and efficiency [Filosofias e eficiência de aplicação]. In **Micronutrients and Toxic Elements in Agriculture** [Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura], eds. FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B. van; ABREU, C. A. Jaboticabal, Brazil: CNPq/ Fapesp/Potafos, p. 255-282, 2011.

LOUÉ, A. **Micronutrients in Agriculture** [Oligoéléments en agriculture]. Antibes, France: SCPA-Nathan. 1993.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Evaluation of Nutritional Status of Plants: principles and applications** [Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações]. Piracicaba, Brazil: Potafos, 1997.

MALAVOLTA, E. **Manual of Mineral Nutrition of Plants** [Manual de Nutrição Mineral de Plantas] São Paulo, Brazil: Agronômica Ceres, 2006.

MARSCHNER, P. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. London, UK: Academic Press, 2012.

MASCARENHAS, H. A. A.; MIRANDA, M. A. C.; BATAGLIA, O. C.; PEREIRA, J. C. V. A.; TANAKA, R. T. Boron deficiency in soybeans **Bragantia**, v. 47, n. 2, p. 325–331, 1988.

MORAES, L. A. C.; MORAES, V. H. F.; MOREIRA, A. Relationship between stem flexibility of rubber tree and boron deficiency. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 10, p. 1431–1436, 2002.

MOREIRA, A.; MORAES, L. A. C. Nutrition and Fertilization of Soybean Crops; macronutrients [Nutrição e Adubação da Cultura da Soja: macronutrientes]. In **Nutrition and Fertilization Crops** [Nutrição e Adubação de Grandes Culturas], ed. PRADO, R. M.; CAMPOS, C.N. S. Jaboticabal, Brazil: FCAV, p. 181-201, 2018.

MOREIRA, A.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A. Yield, boron concentration and evaluation of extractants in soils cultivated with soybean. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 2, p. 367–373, 2010.

MOREIRA, A.; CASTRO, C.; FAGERIA, N. K. Effects of boron application on yield, foliar boron concentration, and efficiency of soil boron extracting solutions in a Xanthic Ferralsol cultivated with banana in Central Amazon. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, n. 18, p. 2169–2178, 2011.

MORTVEDT, J. J. **Micronutrients in Agriculture**. Madison, USA: Soil Science Society of America, 1991.

NABLE, R. O. Effects of B toxicity amongst several barley wheat cultivars: a preliminary examination of the resistance mechanism. **Plant and Soil**, v. 112, n. 1, p. 45–52, 1988.

NADIAN, H.; NAJARZADEGAN, R.; ALAMI SAEID, K.; GHARINEH, M. H. SIADAT, A. Effects of boron and sulfur application on yield and yield components of *Brassica napus* L. in a calcareous soil. **World Applied Sciences Journal**, v. 11, n. 1, p. 89–95, 2010.

OZTURK, M.; SAKCALI, S.; GUCEL, S.; TOMBULOGLU, H. Boron and Plants: boron tolerance, deficiency, and toxicity in plants. In **Plant Adaptation and Phytoremediation**, eds. Ashraf, M.; Ozturk, M.; Ahmad, M. S. A. London: Springer, p. 276-305, 2010.

PEGORARO, R. F.; SANTOS NETO, J. A.; SILVA, I. R.; FONTES, R. L. F.; FARIA, A. F.; MOREIRA, F. F. Soybean growth in response to boron dosages, liming and soil texture. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 4, p. 1092–1098, 2008.

POLLARD, A. S.; PARR, A. J.; LOUGMAN, B. C. Boron in relation to membrane function in higher plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 28, n. 102, p. 531–541, 1977.

POSS, J. A.; GRATTAN, S. R.; GRIEVE, C. M.; SHANNON, M. C. Characterization of leaf boron injury in salt-stressed *Eucalyptus* by image analysis. **Plant and Soil**, v. 206, n. 2, p. 237–245, 1999.

POWER, P. P.; WOODS, W. G. The chemistry of boron and its speciation in plants **Plant and Soil**, v. 193, n. 1, p. 1–13, 1997.

REUTER, J. D.; ROBINSON, J. B. **Plant Analysis; an interpretation manual**. Collingwood: CSIRO, 1997.

ROSOLEM, C. A.; ZANCANARO, L.; BÍSCARO, T. Evaluating available boron and soybean response to boron in an Oxisol from central-western Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2375–2383, 2008.

ROSS, J. R.; SLATON, N. A.; BRYE, K. R.; DELONG, R. E. Boron fertilization influences on soybean yield and leaf and seed boron concentration. **Agronomy Journal**, v. 98, n. 1, p. 198–205, 2006.

SHELP, B. J. Physiology and biochemistry of boron in plants. In **Boron and its role in crop production**, ed. GUPTA, U. C. Boca Raton: CRC Press, p. 53-85, 1993.

SHIREEN, F.; NAWAZ, M. A.; CHEN, C.; ZHANG, Q.; ZHENG, Z.; SOHAIL, H.; SUN, J.; CAO, H.; HUANG, Y.; BIE, Z. Boron: Functions and approaches to enhance its availability in plants for sustainable agriculture. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 7, p. 1856, 2018.

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

SORATTO, R. P.; PEREIRA, M.; COSTA, T. A. M.; LAMPERT, V. N. Sidedressing nitrogen alternative sources and rates on out-of-season corn after soybean. **Revista de Ciências Agrônômicas**, v. 41, n. 4, p. 511–518, 2010.

SUTRADHAR, A. K.; KAISER, D. E.; BEHNKEN, L. M. Soybean response to broadcast application of boron, chlorine, manganese, and zinc. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 3, p. 1048–1059, 2017.

Tabela 2. Matéria seca da parte área (MSPA), número de vagens por vaso (NVV), número de grãos por vaso (NGV), relação NGV/NVV e peso de 100 grãos da soja em resposta a fontes e doses de boro.

Doses de B (mg kg ⁻¹)	MSPA (g por vaso)	NVV (n)	NGV (n)	NGV/NVV	100 grãos (g)
H ₃ BO ₃					
0	61,3	68,8	157,8	2,3	10,9
2	72,4	78,0	151,8	1,9	15,0
4	74,1	77,0	145,8	1,9	14,5
8	67,9	53,0	119,8	2,3	15,7
16	58,9	36,0	85,0	2,4	16,8
Média	66,9	62,6	132,0	2,2	14,6
Ulexita					
0	65,8	48,8	107,5	2,2	13,4
2	70,0	55,0	127,8	2,3	16,1
4	73,0	73,5	169,5	2,3	16,7
8	69,5	50,5	117,8	2,3	17,1
16	69,3	59,8	132,8	2,2	14,7
Média	69,5	57,5	131,1	2,3	15,6
Média					
0	63,6	58,8	132,6	2,2	12,2
2	71,2	66,5	139,8	2,1	15,6
4	73,5	75,3	157,6	2,1	15,6
8	68,7	51,8	118,8	2,3	16,4
16	64,1	47,9	108,9	2,3	15,7
Média	68,2	60,0	131,5	2,2	15,1
Teste F					
Fontes (F)	7,181*	6,424*	0,356 ^{NS}	1,101 ^{NS}	9,62*
Doses (D)	21,266*	20,469*	9,940*	1,934 ^{NS}	9,751*
F x D	7,272*	12,578*	7,467*	0,531 ^{NS}	15,170*
CV (%)	4,09	12,28	14,35	12,74	7,24

* e ^{NS} significativo e não significativo a 5% de probabilidade. CV, coeficiente de variação.

Tabela 3. Atributos químicos do solo após a colheita da soja em resposta a fontes e doses de boro.

Doses de B (mg kg ⁻¹)	pH (CaCl ₂)	P (mg kg ⁻¹)	K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	H+Al (cmol _c kg ⁻¹)	CTC (cmol _c kg ⁻¹)	S-SO ₄ ²⁻ (mg kg ⁻¹)	P-Rem (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
H ₃ BO ₃													
0	4,9	5,3	0,07	2,2	1,8	5,2	9,3	5,0	22,7	1,5	142,0	12,9	2,0
2	5,0	6,9	0,06	2,4	1,9	4,9	9,2	4,2	23,6	1,4	131,8	12,4	1,7
4	4,9	7,2	0,05	2,2	1,8	5,2	9,2	2,7	23,8	1,3	104,4	10,6	1,6
8	4,9	6,8	0,04	2,3	1,8	5,2	9,3	2,7	24,4	1,3	110,6	11,1	2,1
16	5,1	8,0	0,03	2,4	1,9	4,8	9,2	2,0	25,9	1,5	122,0	12,7	1,2
Média	5,0	6,8	0,05	2,3	1,8	5,1	9,2	3,3	24,1	1,4	122,2	11,9	1,7
Ulexita													
0	5,0	4,3	0,07	2,3	1,8	5,0	9,1	3,4	21,6	1,4	130,7	12,0	2,0
2	5,1	6,5	0,05	2,4	1,9	4,7	9,1	2,7	22,7	1,6	136,8	12,7	2,1
4	4,9	6,8	0,05	2,2	1,8	5,1	9,2	2,7	23,8	1,5	111,1	13,2	2,1
8	5,0	6,3	0,05	2,3	1,8	5,1	9,2	2,3	22,5	1,2	120,0	12,7	1,8
16	4,9	6,5	0,04	2,2	1,9	5,1	9,2	2,2	24,5	1,4	132,8	11,9	1,2
Média	5,0	6,1	0,05	2,3	1,8	5,0	9,1	2,6	23,0	1,4	126,3	12,5	1,8
Média													
0	5,0	4,8	0,07	2,3	1,8	5,1	9,2	4,2	22,2	1,5	136,4	12,4	2,0
2	5,1	6,7	0,05	2,4	1,9	4,8	9,1	3,5	23,1	1,5	134,3	12,5	1,9
4	4,9	7,0	0,05	2,2	1,8	5,1	9,2	2,7	23,8	1,4	107,8	11,9	1,9
8	4,9	6,6	0,04	2,3	1,8	5,1	9,3	2,5	23,4	1,3	115,3	11,9	2,0
16	5,0	7,2	0,04	2,3	1,9	4,9	9,2	2,1	25,2	1,4	127,4	12,3	1,2
Média	5,0	6,5	0,05	2,3	1,8	5,0	9,2	3,0	23,6	1,4	124,2	12,2	1,8
Teste F													
Fonte (F)	0,154 ^{NS}	3,978 ^{NS}	0,032 ^{NS}	0,122 ^{NS}	0,020 ^{NS}	0,840 ^{NS}	1,427 ^{NS}	4,303*	2,914 ^{NS}	0,038 ^{NS}	0,187 ^{NS}	1,346 ^{NS}	0,091 ^{NS}
Dose (D)	2,135 ^{NS}	1,698 ^{NS}	1,265 ^{NS}	2,287 ^{NS}	2,500 ^{NS}	3,746 ^{NS}	0,717 ^{NS}	3,291*	2,894 ^{NS}	2,092 ^{NS}	1,369 ^{NS}	0,305 ^{NS}	1,918 ^{NS}
F × D	2,327 ^{NS}	1,455 ^{NS}	2,366 ^{NS}	1,174 ^{NS}	0,461 ^{NS}	1,226 ^{NS}	0,863 ^{NS}	3,301*	0,441 ^{NS}	1,137 ^{NS}	0,179 ^{NS}	1,895 ^{NS}	1,256 ^{NS}
CV (%)	1,62	20,21	18,12	5,96	6,15	4,78	2,02	18,04	7,79	11,39	24,00	12,98	19,03

* e ^{NS} significativo e não significativo a 5% de probabilidade. CTC, $[(\sum K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+})/(\sum K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, H+Al)]/100$, CV, coeficiente de variação.

Tabela 4. Teores de nutrientes na folha diagnóstico com pecíolo da soja em resposta a fontes e doses de boro.

Doses de B	N (g kg ⁻¹)	P (g kg ⁻¹)	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)	S (g kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
H ₃ BO ₃										
0	20,3	3,3	25,4	10,3	4,7	1,3	5,7	53,8	118,7	49,9
2	24,0	2,2	19,4	8,5	3,9	1,6	4,6	54,6	92,9	38,3
4	26,5	2,1	19,2	8,1	4,2	1,6	7,2	62,0	88,5	40,5
8	27,1	2,1	14,2	9,0	4,1	1,6	6,6	65,8	84,3	38,3
16	34,0	1,7	12,2	7,9	4,5	2,1	6,4	93,2	94,8	49,7
Média	26,4	2,3	18,1	8,8	4,3	1,7	6,1	65,9	95,8	43,4
Ulexita										
0	22,7	2,1	13,2	9,2	3,7	1,4	4,3	44,1	94,5	39,4
2	25,1	1,8	12,7	8,0	3,7	1,5	4,8	43,2	85,1	39,5
4	26,8	1,8	12,5	7,4	4,0	1,5	5,3	50,0	104,4	41,0
8	24,5	1,6	11,9	7,4	3,6	1,6	5,1	64,3	84,5	38,5
16	27,0	1,5	11,9	7,1	3,9	1,6	4,0	61,4	79,1	35,2
Média	25,2	1,8	12,4	7,8	3,8	1,5	4,7	52,6	89,5	38,7
Média										
0	21,5	2,7	19,3	9,8	4,2	1,4	5,0	49,0	106,6	44,7
2	24,6	2,0	16,1	8,3	3,8	1,6	4,7	48,9	89,0	38,9
4	26,7	2,0	15,9	7,8	4,1	1,6	6,2	56,0	96,5	40,8
8	25,8	1,9	13,1	8,2	3,8	1,6	5,8	65,1	84,4	38,4
16	30,5	1,6	12,1	7,5	4,2	1,9	5,2	77,3	86,9	42,5
Média	25,8	2,0	15,3	8,3	4,0	1,6	5,4	59,3	92,7	41,0
Teste F										
Fonte (F)	2,308 ^{NS}	15,838*	48,825*	6,815*	13,025*	5,174*	11,826*	8,171*	0,821 ^{NS}	3,020 ^{NS}
Dose (D)	12,041*	10,816*	11,649*	1,069 ^{NS}	1,541 ^{NS}	10,930*	1,557 ^{NS}	4,463*	1,553 ^{NS}	0,853 ^{NS}
F x D	8,565*	4,251*	8,434*	2,740*	1,290 ^{NS}	4,333*	1,405 ^{NS}	2,285 ^{NS}	1,332 ^{NS}	1,765 ^{NS}
CV (%)	9,08	17,38	15,43	15,14	10,61	10,49	21,95	24,49	21,80	19,63

* e ^{NS} significativo e não significativo a 5% de probabilidade. CV, coeficiente de variação.



Figura 4. Sintomas de toxidez de boro no tratamento com aplicação de 8 e 16 mg kg⁻¹ de B com a fonte H₃BO₃.

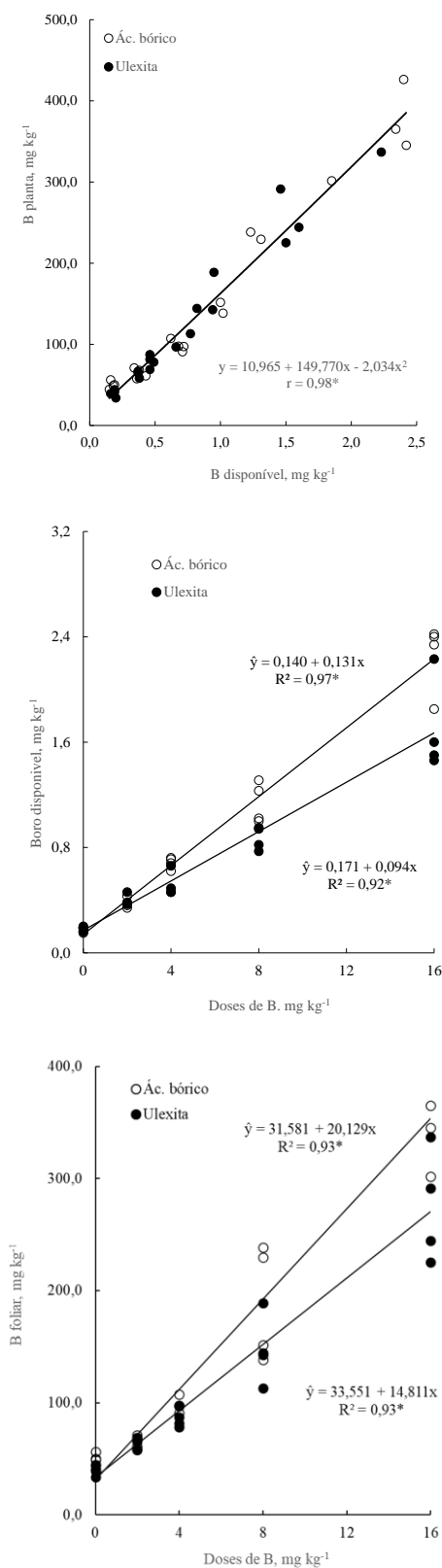


Figura 5. Correlação B disponível no solo e na folha e teores de B disponível no solo e total na folha diagnóstico com pecíolo em resposta as fontes e doses de B. *significativo a 5% de probabilidade.

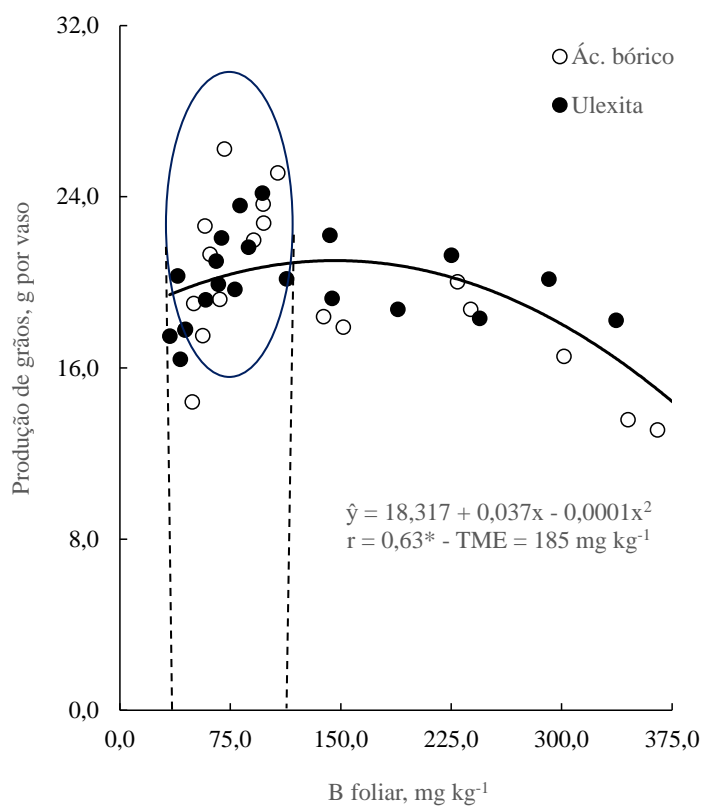
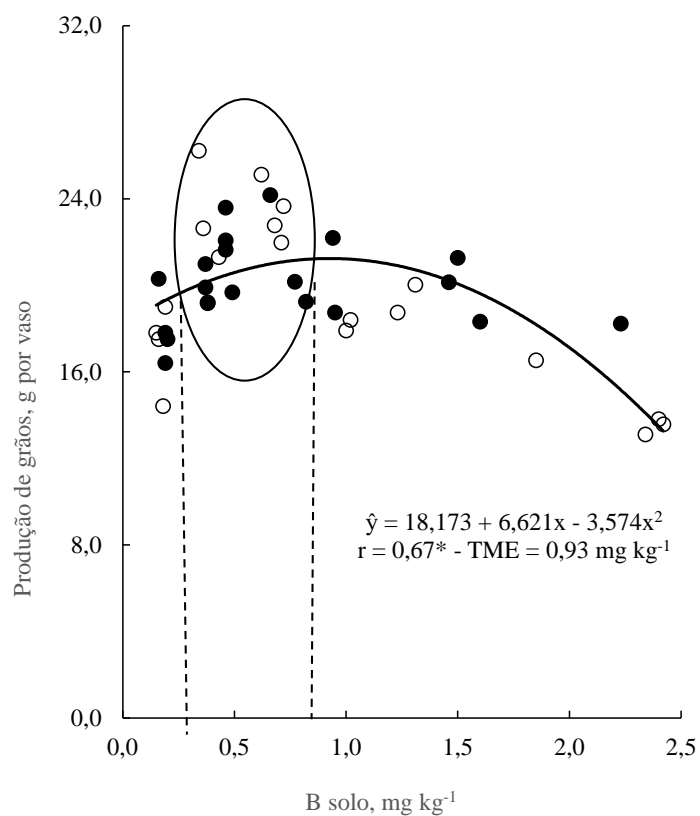


Figura 6. Correlação B disponível no solo e na folha diagnóstico com a produção de grãos. TME, teor máximo estimado. *significativo a 5% de probabilidade.

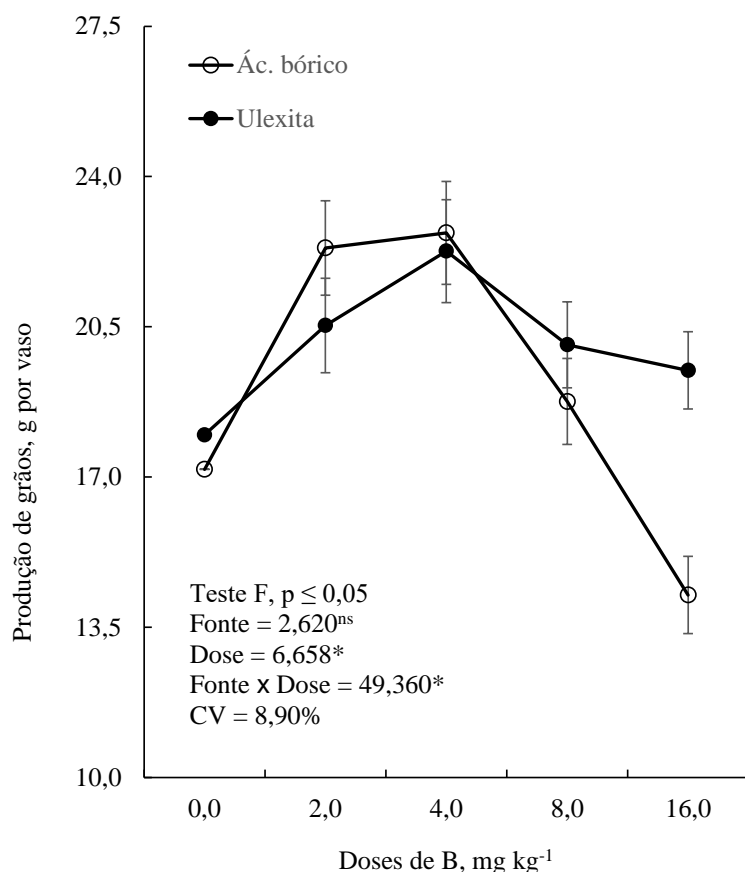


Figura 7. Produção de grãos (PG) por vaso em resposta as doses e fontes de boro. CV, coeficiente de variação. * e ^{NS} significativo e não significativo a 5% de probabilidade.

4.2 ARTIGO B

INFLUÊNCIA DE DOSES DE BORO COM DIFERENTES FONTES NO SISTEMA RADICULAR E QUALIDADE DE SEMENTES DE SOJA

Resumo: A soja tem apresentado desempenho crescente em termos de produtividade nos últimos anos. Todavia, mesmo com esse crescimento, a falta de controle de qualidade e a carência de estudos sobre os efeitos do estado nutricional das plantas tem comprometido a germinação e o vigor de parte significativa das sementes. O objetivo deste trabalho foi identificar a dose ideal de ácido bórico e ulexita, como fontes de B, para a melhoria da qualidade das sementes e crescimento radicular da soja em um Latossolo Vermelho Distrófico. O delineamento experimental utilizado foi o

inteiramente casualizado em esquema fatorial 2×5 , com duas fontes (H_3BO_3 e ulexita) e cinco doses de B (0, 2, 4, 8 e 16 mg kg^{-1}). As fontes e doses de B apresentaram interação significativa, com aumento do volume radicular (VR), protusão radicular (PR), comprimento da parte aérea (CPA), comprimento radicular (CR) e peso de 100 sementes da soja, enquanto o teor de lignina no tegumento (LT) diminuiu com o incremento das doses sem efeito de interação, indicando efeito deletério para o aumento da longevidade para o período de armazenamento das sementes independentemente da fonte de B utilizada.

Palavras-chave: *Glycine max*, qualidade da semente, fertilizantes boratados

Abstract: Soybean has shown increasing performance in terms of productivity in recent years. However, even with this growth, the lack of quality control and the lack of studies on the effects of the nutritional status of the plants has compromised the germination and vigor of a significant part of the seeds. The objective of this work was to identify the ideal dose of boric acid and ulexite, as sources of B, for the improvement of seed quality and root growth of soybean in a Dystrophic Red Latosol. The experimental design used was completely randomized in a 2×5 factorial scheme, with two sources (H_3BO_3 and ulexite) and five doses of B (0, 2, 4, 8 and 16 mg kg^{-1}). The sources and doses of B showed significant interaction, with increase in root volume (RV), root protrusion (PR), shoot length (CPA), root length (CR) and weight of 100 soybean seeds, while the B content lignin in the tegument (LT) decreased with the increment of the doses without interaction effect, indicating a deleterious effect for the increase of the longevity for the period of storage of the seeds regardless of the source of B used.

Keywords: *Glycine max*, seed quality, borate fertilizers

Introdução

Antes do plantio, a seleção das sementes é de fundamental importância nas cadeias produtivas, visto que a qualidade de germinação e vigor para o desenvolvimento inicial das plantas é necessário para se obter altos rendimentos de

produção (COSTA *et al.*, 2003). Dentro deste contexto, a qualidade fisiológica das sementes pode ser reduzida pela deterioração decorrente de fatores associados às mudanças bioquímicas e fisiológicas, que provocam alterações na viabilidade, decréscimo na capacidade germinativa, causados pela desestruturação das membranas celulares, resultando aumento da permeabilidade celular (MANN *et al.*, 2002).

As funções fisiológicas e os fatores genéticos que influenciam a viabilidade e o vigor de sementes são pouco conhecidos e, em geral, a seleciona-se as que produzam as melhores características de germinação e vigor, ignorando a ação bioquímica (REIS *et al.*, 1989). Na adubação é necessário fazer sempre uma aplicação balanceada dos nutrientes, levando sempre em consideração as necessidades fisiológicas de cada estágio das culturas. A carência dos nutrientes, principalmente os de baixa mobilidade nos vasos do floema acarreta a necessidade de fluxo contínuo, para que esteja em condições adequadas até a formação plena dos grãos ou frutos (MALAVOLTA, 2006; FAGERIA, 2009).

Dentre os micronutrientes, a carência de boro (B), por ocorrer em muitas áreas, é uma das que mais afetam a produção e por ser imóvel nos vasos do floema e ser absorvido preferencialmente por fluxo de massa (BARBER, 1984), não é redistribuído nas plantas, assim a deficiência nutricional se apresenta com maior nitidez nos órgãos mais novos ou de crescimento (MALAVOLTA, 2006; MARSCHNER, 2012). As principais funções do B são na translocação de açúcares e na formação da parede celular (MORAES *et al.*, 2002). Na soja (*Glycine max* (L.) Merrill), o B é o mais limitante na produção e a fonte preferencialmente utilizada é o ácido bórico (H_3BO_3), no entanto, a utilização de fontes menos solúveis podem suprir com mais eficiência todo ciclo da cultura (LOUÉ, 1993; HAVLIN *et al.*, 2013).

O objetivo deste trabalho foi identificar a dose ideal da aplicação de duas fontes de B com diferentes solubilidades (H_3BO_3 e ulexita) na qualidade fisiológica de sementes de soja cultivada em um Latossolo Vermelho Distrófico típico.

Material e Métodos

Local do experimento

O experimento foi realizado em condições de casa de vegetação na Embrapa Soja localizada em Londrina, Estado do Paraná nas coordenadas 23°11'37" LS e 51°11'03" LO e altitude média de 630 metros. O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho Distrófico coletado no município de Ponta Grossa, Estado do Paraná em área de mata nativa com os seguintes atributos químicos na camada de 0-20 cm: pH (CaCl₂) = 4,2, MOS = 38,1 g kg⁻¹, P = 7,1 mg kg⁻¹ (Mehlich 1), K⁺ = 0,3 cmol_c kg⁻¹, Ca²⁺ = 2,8 cmol_c kg⁻¹, Mg²⁺ = 1,2 cmol_c kg⁻¹, Al³⁺ = 0,9 cmol_c kg⁻¹, H+Al = 8,3 cmol_c kg⁻¹, CTC = 12,7 cmol_c kg⁻¹, S-SO₄²⁻ = 4,0 mg kg⁻¹, B = 0,3 mg kg⁻¹, Cu = 1,4 mg kg⁻¹, Fe = 221,6 mg kg⁻¹, Mn = 29,2 mg kg⁻¹, Zn = 1,1 mg kg⁻¹, areia = 38 g kg⁻¹ e argila = 510 g kg⁻¹. As análises foram feitas de acordo com os procedimentos descritos em Embrapa (1997).

Delineamento estatístico, adubação e plantio

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 × 5, com duas fontes de boro [ácido bórico (18% de B) e ulexita (12% de B)], aplicadas em cinco doses (0, 2, 4, 8 e 16 mg kg⁻¹), com quatro repetições. Trinta dias antes do plantio foi aplicado o equivalente a 5,0 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (MgO > 12%). As adubações com P, K, S, Co, Cu, Fe, Mn, molibdênio (Mo), níquel (Ni) e Zn foram feitas de acordo com MOREIRA *et al.* (2011) adaptadas de ALLEN *et al.* (1976) para experimentos conduzidos em condições de casa de vegetação [150 mg kg⁻¹ de P-fosfato monoamônio (MAP), 1,5 mg kg⁻¹ de Cu (CuSO₄·7H₂O), 0,1 mg kg⁻¹ de molibdênio - Mo (Na₂Mo₄·2H₂O), 2,5 mg kg⁻¹ de Fe (FeSO₄·2H₂O), 0,01 mg kg⁻¹ de cobalto - Co (CoCl₂), 0,01 mg kg⁻¹ de níquel - Ni (NiSO₄·6H₂O), 5,0 mg kg⁻¹ de Mn (MnSO₄·3H₂O) e 5,0 mg kg⁻¹ de Zn (ZnSO₄·7H₂O)]. O N foi suprido pela inoculação das sementes com um coquetel de *Bradyrhizobium elkanii* + *B. japonicum* e as doses de B dentro de cada experimento. Nos estádios V2 e V4 foram feitas as adubações de cobertura parceladas duas vezes com 50 mg kg⁻¹ de K (K₂SO₄), totalizando 100 mg kg⁻¹ no ciclo.

Os vasos foram irrigados diariamente com água deionizada para manter o solo em umidade próxima a 70% do volume total de poros (VTP), havendo uma abertura no fundo de cada vaso, onde a água que escorria era devolvida ao sistema. Foram semeadas em cada vaso, dez sementes da cultivar BRS 1003 IPRO de ciclo

indeterminado, e após o desbaste foram deixadas duas plantas uniformes por vaso de barro de 3 L de capacidade.

Análises de sementes

No final do ciclo de cultivo da soja (R8, FEHR *et al.*, 1971) foram coletadas as amostras para determinação do peso de 100 sementes e, posteriormente, submetidas aos testes de qualidade fisiológica de sementes de soja de acordo com MAPA (2009). O teste de germinação foi realizado de acordo com as regras para análise de sementes (MAPA, 2009). Para o percentual médio de germinação, os valores de plântulas normais das quatro subamostras utilizadas foram somados e dividido por dois.

Para o teste de comprimento de plântulas da parte aérea (CPA) e sistema radicular (CR), foram utilizadas cinco repetições e arranjadas de forma orientada com a micrópila voltada para a parte inferior do papel, direcionando assim, o crescimento retilíneo das plântulas. Após os três dias, as plântulas foram retiradas do germinador e escaneadas e analisadas com o programa VIGORS® (LEITE *et al.*, 2019). A condução do teste de envelhecimento acelerado (EA) as sementes foram divididas em quatro repetições e utilizou os procedimentos descritos por Marcos Filho (1999). Após completar 24 e 48 horas de exposição às condições de 41 °C, as amostras foram retiradas para a realização do teste de germinação, analisando o seu grau de deterioração.

Para protrusão de raízes (PR), as sementes foram colocadas em caixas plásticas esterilizadas a 25 °C. Após 48 horas, foi feita a leitura, medindo as plântulas com auxílio de uma régua e verificando quais plântulas emitiram raízes primárias de no mínimo de 2,0 cm, sendo que nas mesmas plântulas foi determinado o comprimento total (MAPA, 2009). Na determinação da concentração de lignina no tegumento (LT) das sementes, foi utilizado o método de Alvarez *et al.* (1997), em que as sementes permanecem submersas em água, por aproximadamente 12 horas e em seguida, o tegumento foi separado do cotilédone, e submetido a desidratação em estufa à temperatura de 105°C por 16 horas. Posteriormente o tegumento foi moído e passado em tamise. Então, o material com granulação de 60 Mesh, foi transferido para um frasco de 250mL, adicionado etanol 80% (p/v) e aquecido a 100°C sob refluxo por 10 minutos. As amostras foram filtradas e o sedimento transferido para o frasco com

adição de água destilada deionizada, sendo aquecido sob refluxo por 10 minutos. Após serem filtradas em cadinho com vidro sinterizado, os resíduos foram lavados com acetona e transferidos para um Becker e adicionou-se ácido sulfúrico 72% (p/v), ficando em repouso por 12 horas. Após o tempo determinado, as amostras foram hidrolisadas e transferidas para frascos de 250 mL com a adição de água destilada deionizada, sendo aquecido por duas horas sob refluxo. Após este tratamento, os resíduos foram filtrados em cadinhos com vidro sinterizado sob vácuo e lavados com água destilada e secados a 105°C por seis horas. A concentração de LT foi determinada por gravimetria. No solo foram retiradas as raízes dos vasos e quantificado o volume radicular (VR) em função de cada tratamento.

Análise estatística

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade dos resíduos de Shapiro-Wilk e de homogeneidade de variância (teste de Bartlett). Utilizamos a análise de variância (ANAVA), teste F e de acordo com cada variável os tratamentos significativos pela ANAVA foram comparados pelo teste t ou foi estabelecido modelo de regressão. Adicionalmente, a associação entre as variáveis foi quantificada pelo coeficiente de correlação linear de Pearson. Todos os testes foram realizados ao nível de significância de 5%.

Resultados e Discussão

Os resultados de envelhecimento acelerado (EA), germinação, comprimento da parte aérea (CPA) e radicular (CR), protrusão radicular (PR) e peso de 100 sementes estão apresentados na Tabela 1. A porcentagem de EA e germinação não foram influenciados pelas fontes e doses de B e interação fontes e dose, enquanto o CPA, CR, PR e peso de 100 sementes apresentaram interação altamente significativa e, exceto o CR que não apresentou resposta em função das fontes de B, houve também efeito das fontes e doses de B. Esse resultado concorda com Hanson (1991), ao descrever que a disponibilidade de B influencia na formação do embrião e dos cotilédones, com efeito positivo sobre o aumento do vigor e da qualidade fisiológica das sementes. No entanto, a ausência de efeito sobre o EA e porcentagem de germinação também demonstram que, independentemente da qualidade nutricional,

a ausência de danos no tegumento e o armazenamento com umidade e temperatura adequado das sementes é o principal fator para essas duas variáveis.

Observou-se que a CPA e CR na fonte H_3B_3 apresentaram correlação significativa com a produção de sementes ($r = +0,64$ e $-0,65$, $p \leq 0,05$), enquanto na ulexita, somente o CR apresentou significância ($r = +0,73$, $p \leq 0,05$), indicando resposta distintas entre as fontes de maior e menor solubilidade. O aumento do CPA e CR é importante para que as plantas tenham um desenvolvimento inicial rápido e com isso, possam ter maior capacidade de absorver os nutrientes no solo com o fim da reserva da semente, além disso, durante a fase de germinação as sementes mais vigorosas possuem maior facilidade para transferir a massa seca dos tecidos de reserva para o eixo embrionário, originando plântulas com maior peso, em função do maior acúmulo de matéria seca (NAKAGAWA, 1999).

Os valores da PR e peso de 100 sementes apresentaram interação fonte \times doses de B e aumentaram significativamente com o incremento linear das doses na fonte H_3BO_3 , enquanto na ulexita houve efeito quadrático para PR e peso de 100 sementes (Tabela 1). Na média das fontes, o efeito foi quadrático, com os maiores valores de PR e peso de 100 sementes obtidos na dose máxima estimada de 16,0 e 10,0 $mg\ kg^{-1}$, respectivamente. O B auxilia na transferência de açúcares e outros nutrientes das folhas para os órgãos reprodutivos da planta com aumento na qualidade e quantidade de polinização e melhor desenvolvimento das sementes (BLEVINS; LUKASZEWSKI, 1998; CIRAK et al., 2006). Além disso, a aplicação de B acarretou aumento significativo na PG e a análise de correlação indicou um dos fatores no aumento de rendimento foi o aumento do peso de 100 sementes ($\hat{y} = 0,6475 + 0,705x$, $r = 0,77$, $p \leq 0,05$). Com relação a PR, apesar do efeito positivo das doses na média das duas fontes de B, não apresentou correlação com PG ($r = 0,04$, $p > 0,05$).

Com relação ao teor de lignina no tegumento (LT), houve efeito das fontes (F) e doses (D) e ausência de interação $F \times D$, indicando que, independentemente da fonte utilizada, o teor de LT diminuiu com o incremento das doses de B (Figura 1), ou seja, a adubação boratada em excesso deve ser observada com cuidado e com monitoramento constante, visto que apesar dos altos teores de LT ser altamente promissor por manter a qualidade da fisiológica das sementes de soja por maior período, a baixa concentração também pode ser prejudicial quando for necessário o

retardamento da colheita (BRACCINI, 1993). Essa observação sobre a qualidade da LT é relevante, como reportado por Zhou et al. (2021), que observaram relação inversa do teor de B no tecido com a LT, com maior acúmulo de lignina nas plantas com deficiência de B. Esses autores ao analisar as principais enzimas da biossíntese de lignina verificaram que a deficiência de B aumentou a atividade das enzimas fenilalanina amônia-liase (PAL), cinamato-4-hidroxilase (C4H), hidroxicinamoil, CoA redutase (CCR) e cinamil álcool desidrogenase (CAD). Da mesma forma, os níveis de expressão de genes-chave da biossíntese de lignina tiveram incremento sob estresse por deficiência de B, fatores esses, que diminuem a qualidade e quantidade da lignina na planta. Outro fator a destacar é que o acúmulo de grande quantidade de lignina nas paredes celulares e nos feixes vasculares das nervuras foliares altera a estrutura e restringe a função dos feixes vasculares, dificultando a passagem da seiva tanto no floema quanto no xilema. Além disso, muitos feixes vasculares pequenos, novos e estruturalmente incompletos ao redor do feixe vascular original é comprimido, rompendo a epiderme alterando a qualidade do tecido (ZHOU *et al.*, 2021).

Devido a maior disponibilidade, os teores de LT nos tratamentos com as doses de H_3BO_3 foram maiores que na ulexita e variaram de 45,0 a 41,4 $mg\ g^{-1}$ e 44,8 a 40,2 $mg\ g^{-1}$ e valor médio de 43,1 e 42,3 $mg\ g^{-1}$ nas fontes H_3BO_3 e ulexita, respectivamente. Apesar dos efeitos negativo das doses de B, os valores estão bem acima dos 35,9 $mg\ g^{-1}$ obtidos por Gris *et al.* (2010) na avaliação da qualidade fisiológica e teor de LT em cultivares de soja cultivada em condições de campo, ou seja, diferentes condições de cultivo (casa de vegetação e campo) podem ter influenciado essas diferenças nos teores de LT.

Houve interação significativa das doses de B com as fontes no volume de raízes (VR) e resposta linear entre a produção de grãos e o VR (Figura 2), ou seja, as fontes asseguram a disponibilidade do nutriente em níveis adequados durante o desenvolvimento da soja sem causar problemas de fitotoxidez até a dose máxima estimada (DME) de 4,6 $mg\ kg^{-1}$. O menor VR no H_3BO_3 nas maiores doses de B se deve ao fato que essa fonte apresenta alta solubilidade em água, o que possibilita um maior contato com o sistema radicular das plantas e conseqüente aumento na absorção do nutriente (Moreira et al., 2006). O incremento do VR até a DME corrobora os argumentos de Loué (1993) e Marschner (2012), ao relatarem que a carência de B causa inibição da alongação das raízes, devido a problemas observados durante a

divisão celular e na alongação das células, tornando-as grossas, com baixo volume e com as pontas necróticas. Sua deficiência também afeta a complexação de compostos orgânicos da função cis-diol, inibindo o crescimento radicular (RÖMHELD, 2001). Resultados semelhantes do efeito positivo do B sobre o sistema radicular também foram obtidos por Moreira et al., (2006), ao reportarem aumento do número de raízes e presença de fitotoxidez de B com aplicação de doses elevadas de H_3BO_3 .

Baseado nos resultados de presente trabalho, a aplicação de B no solo é uma alternativa viável com resultados positivos no fornecimento do nutriente para o aumento da qualidade das sementes de soja. No entanto, dependo da solubilidade da fonte, a escolha das doses deve ser realizada com critério. Mesmo com esses avanços, Cirak et al. (2006) relatam que ainda existem resultados contraditórios e estudos são necessários para clarificar os efeitos do B na qualidade fisiológica das sementes de soja.

Conclusões

A qualidade das sementes e o manejo adequado da adubação são fatores primordiais para o sucesso da produção, visto que a aplicação de quantidade adequadas de nutrientes, em especial o boro (B), melhoram o crescimento radicular e a qualidade fisiológica das sementes de soja. Os resultados deste trabalho mostram que o envelhecimento acelerado (EA) e porcentagem de germinação não sofrem influência de fontes e doses de B, enquanto o peso de 100 sementes, comprimento radicular de plântulas (CR) e protrusão radicular (PR) apresentaram interação fontes x doses e estão intimamente relacionados a disponibilidade do nutriente no solo, o que não foi observado para o comprimento da parte aérea da planta (CPA). O volume radicular (VR) apresenta relação significativa com as doses de B e está diretamente correlaciona com a produtividade de grãos (PG). No caso do teor de lignina no tegumento (LT), independente da fonte de B, houve relação inversa das doses em relação ao teor de LT, indicando possível efeito negativo no processo de armazenamento e longevidade da semente.

Agradecimentos

À CAPES pelo apoio na realização do experimento, à equipe de Fertilidade do solo e Microbiologia e do Laboratório de sementes da Embrapa Soja pelo apoio no experimento realizado em Londrina (PR) e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pelo apoio financeiro.

Referências

- ALLEN, S. E.; TERMAN, G. L.; CLEMENTS, L. B. **Greenhouse techniques for soil-plant-fertilizer research**. Muscle Shoals, USA: National Fertilizer Development Center, 1976.
- ALVAREZ, P. J. C.; KRYZANOWSKI, F. C.; MANDARINO, J. M. G.; FRANÇA NETO, J. B. Relationship between soybean seed coat lignin content and resistance to mechanical damage. **Seed Science and Technology**, v.25, p.209–214, 1997.
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. New York, USA: John & Wiley, 1984.
- BLEVINS, D. G.; LUKASZEWSKI, K. M. Boron in plant structure and function. **Annual Review: Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 49, p. 481–500, 1998.
- BRACCINI, A. L. **Evaluation of seed physiological quality of soybean varieties and lines (*Glycine max* (L.) Merrill) with different degrees of integument impermeability** [Avaliação da qualidade fisiológica da semente de variedades e linhagens de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) com diferentes graus de impermeabilidade do tegumento]. Viçosa, Brazil: Universidade Federal de Viçosa, 1993.
- CIRAK, C.; ODABAS, M. S.; KUDRET, K.; EMEL, K.; ALI, G. Response of soybean (*Glycine max*) to soil and foliar applied boron at different rates. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v.76, n. 10, p. 603–606, 2006.
- COSTA, N. P.; MESQUITA, C. M.; MAURINA, A. C.; FRANÇA NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C.; HENNING, A. A. Physical, physiological, and sanitary quality of soybean seed produced in Brazil. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 25, n. 1, p. 128–132, 2003.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Manual for Methods of Soil Analysis** [Manual de Métodos de Análise de Solo]. Rio de Janeiro, Brazil: Embrapa Solos, 1997.
- FAGERIA, N. K. **The Use of Nutrients in Crop Plants**. Boca Raton, USA: CRC Press, 2009.
- FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E.; BURMOOD, D. T.; PENNINGTON, J. S. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. **Crop Science**, v. 11, n. 6, p. 929–931, 1971.

GRIS, C. F.; VON PINHO, E. V. R.; ANDRADE, T.; BALDONI, A.; CARVALHO, M. L. M. Physiological quality and lignin content in the coat seeds of conventional and RR transgenic soybean submitted to different harvest periods. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 2, p. 374–381, 2010.

HANSON, E. How much boron do flowers need. **Better Crops. Atlanta**, v. 75, n. 4, p. 10-11, 1991.

HAVLIN, J. L., S. L. TISDALE, W. L. NELSON, and J. D. BEATON. 2013. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. Upper Saddle River, USA: Pearson Education, 2013.

LEITE, C. A. M.; FRANÇA-NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C.; GOMES JÚNIOR, F. G. **Validação do sistema de análise de imagens Vigor-S para a determinação de fitotoxidades em plântulas de soja**. Londrina, Brazil: Embrapa Soja, 2019.

LOUÉ, A. **Micronutrients in Agriculture** [Oligoéléments en agriculture]. Antibes, France: SCPA-Nathan, 1993.

MALAVOLTA, E. **Manual of Mineral Nutrition of Plants** [Manual de Nutrição Mineral de Plantas] São Paulo, Brazil: Agronômica Ceres, 2006.

MANN, E. N., RESENDE, P. M.; MANN, R. S.; CARVALHO, J. G.; VON PINHO, V. R. Effect of manganese application on yield and seed quality of soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1757–1764, 2002.

MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). **Rules for seed analysis** [Regras para análise de sementes]. Brasília, Brazil: MAPA/ACS, 2009.

MARCOS FILHO, J. Vigor tests: importance and use [Testes de vigor: importância e utilização]. In **Seed vigor; concepts and tests** [Vigor de sementes; conceitos e testes], eds., KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA-NETO, J. B. Londrina, Brazil: ABRATES, p. 1-2, 1999.

MARSCHNER, P. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. London, UK: Academic Press, 2012.

MORAES, L. A. C.; MORAES, V. H. F.; MOREIRA, A. Relationship between stem flexibility of rubber tree and boron deficiency. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 10, p. 1431–1436, 2002.

MOREIRA, A.; FAGERIA, N. K.; GARCIA Y GARCIA, A. Effect of liming on the nutritional conditions and yield of alfalfa grown in tropical conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 34, n. 8, p. 1107–1119, 2011.

MOREIRA, A.; MORAES, V. H. F. CASTRO, C. Sources and rates in rubber rootstocks. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 8, p. 1291–1298, 2006.

NAKAGAWA, J. Vigor tests based on seedling performance [Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas]. In **Seed vigor: concepts and tests** [Vigor de sementes: conceitos e testes], eds., KRZYZANOSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. Londrina, Brazil, ABRATES, v. 1, p. 1-24, 1999.

REIS, W. J. P.; ROCHA, V. S.; REZENDE, S. T. Correlação entre a evolução de n-hexanal e aldeídos totais e a germinação e vigor de sementes de soja. **Revista Ceres**, v. 36, n. 203, p. 27–37, 1989.

RÖMHELD, V. Aspectos fisiológicos dos sintomas de deficiência e toxicidade de micronutrientes e elementos tóxicos em plantas superiores. In **Micronutrientes e Elementos Tóxicos na Agricultura**, eds., FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ van, B.; ABREU, C. A. Jaboticabal, Brazil: CNPq/Fpapes/Potafos, p. 71-88, 2001.

ZHOU, X.; YUE, J.; YANGA, H.; ZHU, C.; ZHUA, F.; LI, J.; XUA, R.; GAO, J.; ZHOU, D.; DENG, X.; CHENGA, Y. Integration of metabolome, histochemistry and transcriptome analysis provides insights into lignin accumulation in oleocellosis-damaged flavedo of citrus fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 172, p. 111362, 2021.

Tabela 5. Médias de envelhecimento acelerado (EA), germinação, comprimento da parte aérea (CPA) e de raízes (CR) de plântulas, protrusão de raízes e peso de 100 sementes em resposta à aplicação de fontes e doses de boro.

Doses de B	EA	Germinação	Parte área da plântula	Raízes da plântula	Protrusão radicular	Peso de 100 sementes
mg kg ⁻¹	(%)	(%)	(cm)	(cm)	(%)	(g)
			H ₃ BO ₃			
0	87,0	96,0	7,0	12,6	19,0	10,9
2	85,5	99,0	7,1	13,0	37,5	15,0
4	85,5	99,0	7,7	13,9	39,3	14,5
8	87,0	98,0	7,6	15,8	39,3	15,7
16	97,3	100,0	6,1	14,6	45,8	16,8
Média	88,5	98,4	7,1	14,0	36,2	14,6
			Ulexita			
	91,5	98,0	7,5	13,7	16,8	13,4
2	79,5	99,0	8,0	14,5	28,0	16,1
4	96,0	98,0	8,0	14,9	42,0	16,7
0	95,5	99,0	7,2	14,3	32,0	17,1
16	96,0	100,0	7,0	14,1	35,8	14,7
Média	91,7	98,8	7,6	14,3	30,9	15,6
			Média			
0	89,3	97,0	7,3	13,2	17,9	12,2
2	82,5	99,0	7,6	13,8	32,8	15,6
4	90,8	98,5	7,9	14,4	40,7	15,6
8	91,3	98,5	7,4	15,1	35,6	16,4
16	96,6	100,0	6,6	14,3	40,8	15,7
Média	90,1	98,6	7,3	14,1	33,5	15,1
Teste F						
Fonte	0,460 ^{NS}	0,250 ^{NS}	6,387*	1,171 ^{NS}	7,439*	9,624*
Dose	2,496 ^{NS}	1,469 ^{NS}	5,872*	3,549*	4,738*	9,751*
Fonte x Dose	0,707 ^{NS}	0,406 ^{NS}	2,229 ^{NS}	2,803*	14,880*	15,170*
CV (%)	10,54	2,57	7,41	7,76	18,63	7,24

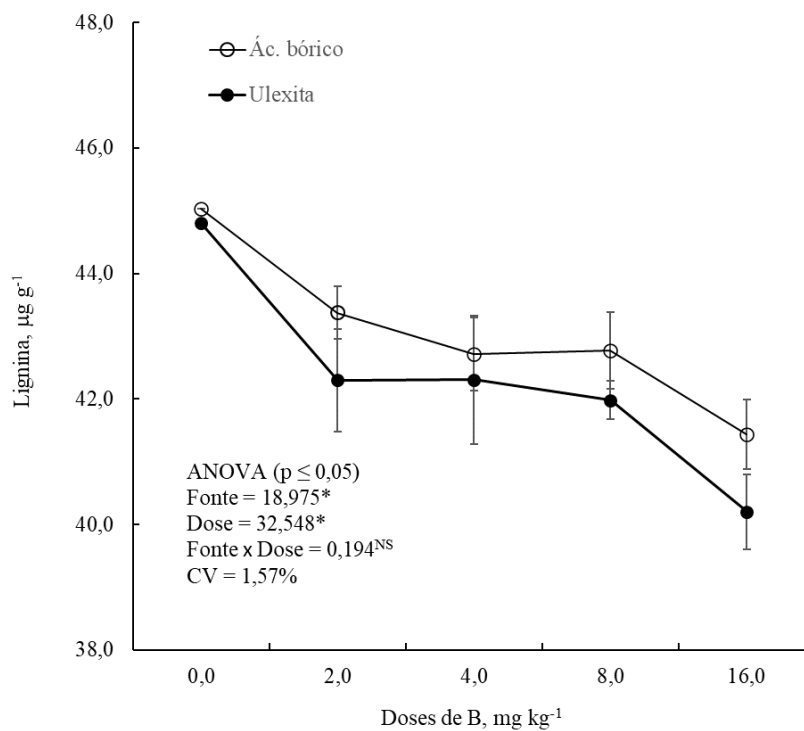


Figura 8. Teor de lignina no tegumento das sementes de soja em resposta à aplicação de fontes e doses de boro. * e ^{NS} significativo e não significativo a 5% de probabilidade.

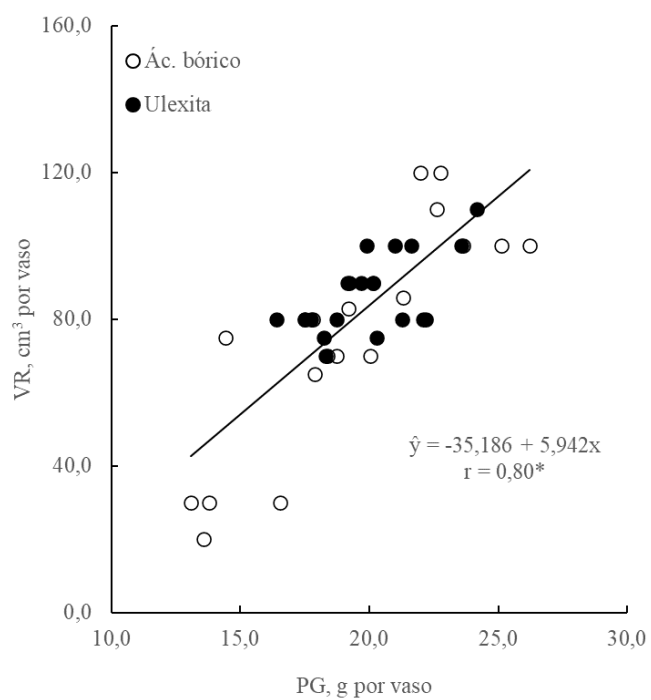
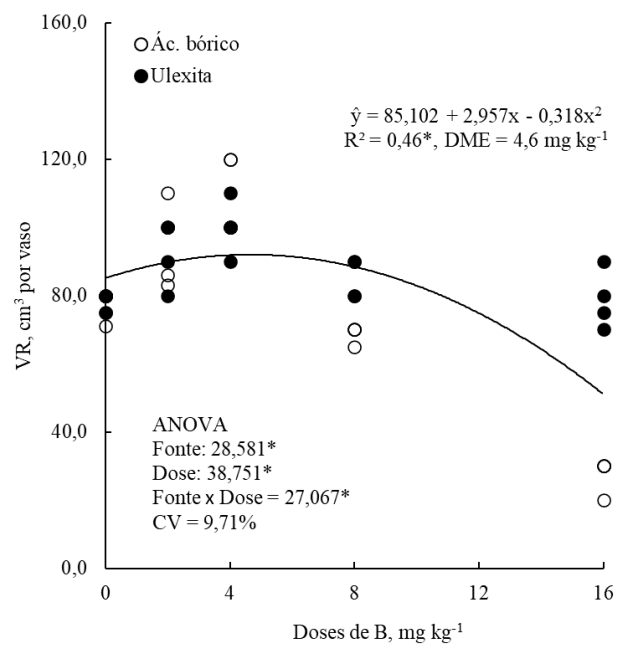


Figura 9. Efeito das fontes e dose de B sobre o volume de raízes (VR) nos vasos e sua correlação com a produção de grãos (PG). *significativo a 5% de probabilidade.

5. CONCLUSÕES

A produção máxima de grãos não apresentou efeito das fontes e foi obtida com a aplicação de $4,0 \text{ mg kg}^{-1}$, o que equivale a 4 kg ha^{-1} para aplicação em sistema plantio direto (SPD, amostragem de 10 cm de profundidade). Houve incremento dos teores de B disponível no solo e folha diagnóstico com o aumento das doses de B com os maiores teores na fonte H_3BO_3 em relação a ulexita. O peso de 100 sementes, comprimento radicular de plântulas (CR) e protrusão radicular (PR) apresentaram interação fontes \times doses e estão intimamente relacionados a disponibilidade do nutriente no solo, o que não foi observado para o comprimento da parte área da planta (CPA). O volume radicular (VR) apresenta relação significativa com as doses de B e está diretamente correlaciona com a produtividade de grãos (PG). No caso do teor de lignina no tegumento (LT), independente da fonte de B, houve relação inversa das doses em relação ao teor de LT, indicando possível efeito negativo no processo de armazenamento e longevidade da semente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C.A.; VAN RAIJ, B.; ABREU, M. F.D.; GONZÁLEZ, A. P. Routine soil testing to monitor heavy metals and boron. **Scientia Agricola**, v. 62, n. 6, p. 564–571, 2005.
- AGARWALA, S. C.; SHARMA, P. N.; CHATTERJEE, C.; SHARMA, C. P. Development and enzymatic changes during pollen development in boron deficient maize plants. **Journal Plant Nutrition**, v. 3, n. 1-4, p. 329–336, 1981.
- AGULHON, H. Presence and utility of boron in plants. **Annales de l'Institut Pasteur**, v. 24, p. 321–329, 1910.
- AHMED, N.; ABID, M.; AHMAD, F.; ULLAH, M.A; JAVAID, Q.; ALI, M. A. Impact of boron fertilization on dry matter production and mineral constitution of irrigated cotton. **Pakistan Journal of Botany**, v. 43, n. 6, p. 2903–2910, 2011.
- ALLEN, S. E.; TERMAN, G. L.; CLEMENTS, L. B. **Greenhouse techniques for soil-plant-fertilizer research**. Muscle Shoals, USA: National Fertilizer Development Center, 1976.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.
- ALVAREZ V. V. H.; NOVAIS, R. D.; BARROS, N. D.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretation of soil analysis results [Interpretação dos resultados das análises de solos]. In **Recommendation for the use of correctives and fertilizers in Minas Gerais: 5th Approximation** [Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação], eds. RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.;
- ALVAREZ V. V. H. Viçosa, Brazil: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, v. 5, p. 25-32, 1999.
- ALVAREZ, P. J. C.; KRYZANOWSKI, F. C.; MANDARINO, J. M. G.; FRANÇA NETO, J. B. Relationship between soybean seed coat lignin content and resistance to mechanical damage. **Seed Science and Technology**, v. 25, p. 209–214, 1997.
- ARNON, D. I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plant with special reference to copper. **Plant Physiology**, v. 14, n. 2, p. 371–375, 1938.
- AOSA (Association of Official Seed Analysts). **Seed vigor testing handbook**. Lincoln: AOSA, Contribution, 2022.
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. New York, USA: John & Wiley, 1984.
- BATAGLIA, O.C.; VAN RAIJ, B. Eficiência de extratores na determinação de boro em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, n. 1, p. 25–31, 1990.
- BELLALOUJ, N.; BROWN, P. H.; DANDEKAR, A. M. Manipulation of in vivo sorbitol production alters boron uptake and transport in tobacco. **Plant Physiology**, v. 119, n. 2, p. 735–741, 1999.

- BLEVINS, D. G.; LUKASZEWSKI, K. M. Boron in plant structure and function. *Annual Review: Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v. 49, n.1, p. 481–500, 1998.
- BOERJAN, W.; RALPH, J.; BAUCHER, M. Lignin Biosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, v. 54, n.1, p. 519–546, 2003.
- BÖESEKEN, J. The use of boric acid for the determination of the configuration of carbohydrates. *Advances in Carbohydrate Chemistry*. Academic Press, 1949. v. 4, p.189–210.
- BRACCINI, A. L. **Evaluation of seed physiological quality of soybean varieties and lines (*Glycine max* (L.) Merrill) with different degrees of integument impermeability** [Avaliação da qualidade fisiológica da semente de variedades e linhagens de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) com diferentes graus de impermeabilidade do tegumento]. Viçosa, Brazil: Universidade Federal de Viçosa, 1993.
- BRDAR-JOKANOVI'Ć, M. Boron toxicity and deficiency in agricultural plants. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 21, n. 4, p. 1424, 2020.
- BROWN, P. H.; HU, H. Phloem mobility of boron is species dependent: evidence for phloem mobility in sorbitol rich species. *Annals of Botany*, v. 77, n. 5, p. 497–505, 1996.
- BROWN, P.H.; SHELPS, B. J. Boron mobility in plants. *Plant and Soil*, v. 193, n. 1, p. 85–101, 1997.
- BROWN, P.H.; BELLALOUÏ, N.; WIMMER, M. A.; BASSIL, E. S.; RUIZ, J.; HU, H.; PFEFFER, H.; DANIEL, F.; RÖMHELD, V. Boron in plant biology. *Plant Biology*, v. 4, n. 2, p. 205–223, 2002.
- BUTLER, G. W., BAILEY, R. W. Chemistry and biochemistry of herbage. **New York: Academic Press**, v. 3, p. 416, 1973.
- BYERS, D. E.; MIKKELSEN, R. L.; COX, F. R. Greenhouse evaluation of for boron fertilizer materials. *Journal of Plant Nutrition*, v. 24, n. 4-5, p. 717–725, 2001.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Seeds: science, technology, and production** [Sementes: ciência, tecnologia e produção]. Jaboticabal, Brazil: FUNEP, 2000.
- CASTRO, C.; MOREIRA, A.; OLIVEIRA, R. F.; DECHEN, A. R. Boron and water stress on yield of sunflower. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 30, n. 2, p. 214–220, 2006.
- CIRAK, C.; ODABAS, M. S.; KUDRET, K.; EMEL, K.; ALI G. Response of soybean (*Glycine max*) to soil and foliar applied boron at different rates. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, v. 76, n. 10, p. 603–606, 2006.
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento da safra brasileira. 4º Levantamento safra 2021/22**. Brasília, Brazil: CONAB, 2022.
- COSTA, N. P.; MESQUITA, C. D. M.; MAURINA, A. C.; FRANÇA NETO, J. B.; KRZYŻANOWSKI, F. C.; HENNING, A. A. Physical, physiological, and sanitary quality of soybean seed produced in Brazil. *Revista Brasileira de Sementes*, v. 25, n. 1, p. 128–132, 2003.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L (eds). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 91-132, 2007.

DORDAS, C.; BROWN, P. H. Permeability of boric acid across lipid bilayers and factors affecting it. **Journal of Membrane Biology**, v. 175, n. 2, p. 95–105, 2000.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 1997. **Manual for Methods of Soil Analysis** [Manual de Métodos de Análise de Solo]. Rio de Janeiro, Brazil: Embrapa Solos, 1997.

FAGERIA, N. K. Optimizing nutrient use efficiency in crop production. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 6–16, 2008.

FAGERIA, N. K. **The Use of Nutrients in Crop Plants**. Boca Raton, USA: CRC Press, 2009.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Micronutrient deficiency problems in South America. In **Micronutrients deficiencies on global crop production**, ed. Alloway, B. J. London: Springer, 2008. p. 245–266.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and Mineral Nutrition of Field Crops**. Madison, USA: Marcel Dekker, 1997.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E.; BURMOOD, D. T.; PENNINGTON, J. S. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. **Crop Science**, v. 11, n. 6, p. 929–931, 1971.

FRANÇA-NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C. 2018. **Semente é tecnologia. o vigor e o desempenho das sementes**. Londrina, Brazil: Associação Brasileira de Sementes e Mudas, p. 32-36, 2018.

FRANÇA-NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C.; HENNING, A. A.; PADUÁ, G. P. **Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade**. Londrina, Brazil: Embrapa Soja, 2016.

GOLDBACH, H.E; WIMMER, M. A. Boron in plants and animals: Is there a role beyond cell wall structure?. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 170, n. 1, p. 39–48, 2007.

GRATTAN, S. R.; DÍAZ, F. J.; PEDRERO, F.; VIVALDI, G. A. Assessing the suitability of saline wastewaters for irrigation of Citrus spp.: emphasis on boron and specific-ion interactions. **Agricultural Water Management**, v. 157, p. 48–58, 2015.

CRIS, C. F.; PINHO, E. V. D. R. V.; ANDRADE, T.; BALDONI, A.; CARVALHO, M. L. D. M. Physiological quality and lignin content in the coat seeds of conventional and RR transgenic soybean submitted to different harvest periods. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 2, p. 374–381, 2010.

GUPTA, U. C. Boron nutrition of crops. **Advances in Agronomy**, v. 31, p. 273–307, 1979.

HANSON, E. How much boron do flowers need? **Better Crops**, v. 75, n. 4, p. 10–11, 1991.

HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil Fertility and Fertilizers: an introduction to nutrient management**. Upper Saddle River, USA: Pearson Education, 2013.

HENNING, F. A.; MERTZ, L. M.; JACOB JUNIOR, E. A.; MACHADO, R. D.; FISS, A.; HIRAKURI, M. H.; LORINI, I. Conjuntura econômica da soja e metodologia de avaliação da qualidade. Londrina, Brasil: Embrapa Soja, 2018.

HU, H.; BROWN, P. H. Absorption of boron by plant roots. **Plant and Soil**, v. 193, n. 1, p. 49–58, 1997.

HU, H.; PENN, S. G.; LEBRILLA, C. B.; BROWN, P. H. Isolation and characterization of soluble boron complexes in higher plants: the mechanism of phloem mobility of boron. **Plant Physiology**, v. 113, n. 2, p. 649–655, 1997.

HULL, R.J. Recent research offers clues to boron's purpose. **Turfgrass Trends**, v. 11, p. 11-16, 2002.

HUTH, C.; MERTZ-HENNING, L. M.; LOPES, S. J.; TABALDI, L. A.; ROSSATO, L. V.; KRZYZANOWSKI, F. C.; HENNING, F. A. Susceptibility to weathering damage and oxidative stress on soybean seeds with different lignin contents in the seed coat. **Journal of Seed Science**, v. 38, n. 4, p. 296–304, 2006.

ISTA (INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION). **Addition of a new vigour method approved by ECOM decision**. Minutes of the Ordinary Meeting, n. 648, p.81–84, 2011.

KARTHIKEYAN, K.; SHUKLA, L. M. Effect of boron-sulphur interaction on their uptake and quality parameters of mustard (*Brassica juncea* L.) and sunflower (*Helianthus annuus* L.). **Journal of the Indian Society of Soil Science**, v. 56, n. 2, p. 225–230, 2008.

KLOCHKO, K.; KAUFMAN, A.J.; YAO, W.; BYRNE, R. H.; TOSSELL, J. A. Experimental measurement of boron isotope fractionation in seawater. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 248, n. 1-2, p. 276–285, 2006.

KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. B.; HENNING, A. A. A alta qualidade da semente de soja: fator importante para a produção da cultura. **Circular técnica**, v. 136, n. 1, 2018.

KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA-NETO, J. B.; MARCOS-FILHO, J. **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina, Brasil: ABRATES, 2020.

LEITE, C. A. M.; FRANÇA-NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C.; GOMES JÚNIOR, F. G. **Validação do sistema de análise de imagens Vigor-S para a determinação de fitotoxidades em plântulas de soja**. Londrina, Brasil: Embrapa Soja, 2019.

LEWIS, D.H. Boron: the essential element for vascular plants that never was. **New Phytologist**, v. 221, n. 4, p. 1685–1690, 2019.

LOPES, A. S.; SOUZA, E. C. A. Application philosophies and efficiency [Filosofias e eficiência de aplicação]. In **Micronutrients and Toxic Elements in Agriculture** [micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura], eds. Ferreira, M. E.; Cruz, M. C.

P.; RAIJ B. van; Abreu, C. A. Jaboticabal, Brazil: CNPq/ Fapesp/Potafos., p. 255-282, 2011.

LOUÉ, A. **Micronutrients in Agriculture** [Oligoéléments en agriculture]. Antibes, France: SCPA-Nathan. 1993.

MALAVOLTA, E. **Manual of Mineral Nutrition of Plants** [Manual de Nutrição Mineral de Plantas] São Paulo, Brazil: Agronômica Ceres, 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA., S. A. **Evaluation of Nutritional Status of Plants: principles and applications** [Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações]. Piracicaba, Brazil: Potafos, 1997.

MANN, E. N.; RESENDE, P. M.; MANN, R. S.; CARVALHO, J. G.; VON PINHO, E. V. D. R. Effect of manganese application on yield and seed quality of soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1757–1764, 2002.

MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). **Rules for seed analysis** [Regras para análise de sementes]. Brasília, Brazil: MAPA/ACS, 2009.

MARCOS FILHO, J. Vigor tests: importance and use [Testes de vigor: importância e utilização]. In **Seed vigor; concepts and tests** [Vigor de sementes; conceitos e testes], eds., KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA-NETO, J. B. Londrina, Brazil: ABRATES, p. 1-21, 1999.

MARCOS FILHO, J. Avaliação do potencial fisiológico de sementes: Testes de Vigor. In **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**, ed. MARCOS FILHO, J. Londrina, Brasil: ABRATES. 2015b. p. 615-656.

MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Londrina, Brasil: Abrates, 2015a.

MARCOS FILHO, J. Teste de envelhecimento acelerado. In **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina, Brasil: Abrates. 1999.

MARSCHNER, P. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. London, UK: Academic Press, 2012.

MASCARENHAS, H. A. A.; MIRANDA, M. A. C. D.; BATAGLIA, O. C.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; TANAKA, R. T. Boron deficiency in soybeans. **Bragantia**, v. 47, n. 2, p. 325–331, 1988.

MAZE, P. Determination des elements minéraux rares nécessaires au développement du maïs. **Compt Rendus de l'Académie des Sciences**, v. 160, p. 211–214, 1915.

MCDONALD, M.B.; PHANNENDRANATH, B. R A modified accelerated aging vigor test procedure. **Journal of Seed Technology**, v. 3, n. 1, p. 27–37, 1978.

MOLLER, M. R. F.; VIÉGAS, I. J. M.; MATOS, A. D. O.; PARRY, M. M. **Análises de tecido vegetal: manual de laboratório**. Belém, Brasil: Embrapa Amazônia Oriental, 1997.

MORAES, L. A. C.; MORAES, V. H. F.; MOREIRA, A. Relationship between stem flexibility of rubber tree and boron deficiency. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 10, p. 1431–143, 2002.

- MOREIRA, A., and L. A. C. MORAES. 2018. Nutrition and Fertilization of Soybean Crops; macronutrients [Nutrição e Adubação da Cultura da Soja: macronutrientes]. In **Nutrition and Fertilization Crops** [Nutrição e Adubação de Grandes Culturas], ed. R. M. PRADO, and C. N. S. CAMPOS, 181–201. Jaboticabal, Brazil: FCAV.
- MOREIRA, A.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A. Yield, boron concentration and evaluation of extractants in soils cultivated with soybean. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, p. 367–373, 2010.
- MOREIRA, A.; CASTRO, C.; FAGERIA, N. K. Effects of boron application on yield, foliar boron concentration, and efficiency of soil boron extracting solutions in a Xanthic Ferralsol cultivated with banana in Central Amazon. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, n. 18, p. 2169–2178, 2011.
- MOREIRA, A.; FAGERIA, N. K.; GARCIA Y GARCIA, A. Effect of liming on the nutritional conditions and yield of alfalfa grown in tropical conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 34, n. 8, p. 1107–1119, 2011.
- MOREIRA, A.; MORAES, V. H. F.; CASTRO, C. Sources and rates in rubber rootstocks. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 8, p. 1291–1298, 2006.
- MORTVEDT, J. J. **Micronutrients in Agriculture**. Madison, USA: Soil Science Society of America, 1991.
- NABLE, R. O. Effects of B toxicity amongst several barley wheat cultivars: a preliminary examination of the resistance mechanism. **Plant and Soil**, v. 112, n. 1, p. 45–52, 1988.
- NADIAN, H.; NAJARZADEGAN, R.; SAEID, K. A.; GHARINEH, M. H.; SIADAT, A. Effects of boron and sulfur application on yield and yield components of *Brassica napus* L. in a calcareous soil. **World Applied Sciences Journal**, v. 11, n. 1, p. 89–95, 2010.
- NAKAGAWA, J. Vigor tests based on seedling performance [Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas]. In **Seed vigor: concepts and tests** [Vigor de sementes: conceitos e testes], eds., Krzyzanoski, F. C.; Vieira, R. D.; França Neto, J. B. Londrina, Brazil, ABRATES, v. 1, p. 1-24, 1999.
- NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. S.; PINTO, L. F. D. Atlas climático do estado do Paraná. **Londrina, PR: Instituto Agronômico do Paraná**, 2019.
- OZTURK, M.; SAKCALI, S.; GUCEL, S.; TOMBULOGLU, H. Boron and Plants: boron tolerance, deficiency, and toxicity in plants. In **Plant Adaptation and Phytoremediation**, eds. Ashraf, M.; Ozturk, M.; Ahmad, M. S. A. London: Springer, p. 276-305, 2010.
- PADBHUSHAN, R.; KUMAR, D. Fractions of soil boron: a review. **Journal of Agricultural Science**, v. 155, n. 7, p. 1023–1032, 2017.
- PEGORARO, R. F.; SANTOS NETO, J. A.; SILVA, I. R.; FONTES, R. L. F.; FARIA, A. F.; MOREIRA, F. F. Soybean growth in response to boron dosages, liming and soil texture. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 4, p. 1092–1098, 2008.
- PEREIRA, G. L.; SIQUEIRA, J. A.; BATISTA-SILVA, W.; CARDOSO, F. B.; NUNES-NESEI, A.; ARAÚJO, W. L. Boron: More Than an Essential Element for Land Plants? **Frontiers in Plant Science**, v.11, p. 610307, 2021.

- PITTELKOW, F. K.; PASQUALLI, R. M. Importância da Qualidade das Sementes. **Boletim Técnico: Safra 2013/14**. Rio Verde, Brasil: Fundação Rio Verde, 2014.
- POLLARD, A. S.; PARR, A. J.; LOUGMAN, B. C. Boron in relation to membrane function in higher plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 28, n. 102, p. 531–541, 1977.
- POSS, J. A.; GRATTAN, S. R.; GRIEVE, C. M.; SHANNON, M. C. Characterization of leaf boron injury in salt-stressed *Eucalyptus* by image analysis. **Plant and Soil**, v. 206, n. 2, p. 237–245, 1999.
- POWER, P. P.; WOODS, W. G. The chemistry of boron and its speciation in plants **Plant and Soil**, v. 193 n. 1, p. 1–13, 1997.
- REIS, W. J. P.; ROCHA, V. S. REZENDE, S. T. Correlação entre a evolução de n-hexanal e aldeídos totais e a germinação e vigor de sementes de soja. **Revista Ceres**, v. 36, n. 203, p. 27–37, 1989.
- REUTER, J.; ROBINSON, J. B. **Plant Analysis: an interpretation manual**. Collingwood: CSIRO, 1997.
- RÖMHELD, V. Aspectos fisiológicos dos sintomas de deficiência e toxicidade de micronutrientes e elementos tóxicos em plantas superiores. In **Micronutrientes e Elementos Tóxicos na Agricultura**, eds., FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ van, B.; ABREU, C. A. Jaboticabal, Brazil: CNPq/Fapesp/Potafos, p. 71-88, 2001.
- ROSOLEM, C. A.; ZANCANARO, L.; BÍSCARO, T. Evaluating available boron and soybean response to boron in an Oxisol from central-western Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2375–2383, 2008.
- ROSOLEM, C. A.; BÍSCARO, T. Adsorção e lixiviação de boro em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 1473–1478, 2007
- ROSS, J. R.; SLATON, N. A.; BRYE, K. R.; DELONG, R. E. Boron fertilization influences on soybean yield and leaf and seed boron concentration. **Agronomy Journal**, v. 98, n. 1, p. 198–205, 2006.
- SU WAN-LONG; LIU, N.; MEI, L.; LUO, J.; ZHU, Y. J.; LIANG, Z. Global transcriptomic profile analysis of genes involved in lignin biosynthesis and accumulation induced by boron deficiency in poplar roots. **Biomolecules**, v. 9, n. 4, p. 156, 2019.
- SHELP, B. J. Physiology and biochemistry of boron in plants. In **Boron and its role in crop production**, ed., Gupta, U. G. Boca Raton: CRC Press, p. 53-85, 1993.
- SHIREEN, F.; NAWAZ, M. A.; CHEN, C.; ZHANG, Q.; ZHENG, Z.; SOHAIL, H.; SUN, J.; CAO, H.; HUANG, Y.; BIE, Z. Boron: Functions and approaches to enhance its availability in plants for sustainable agriculture. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 7, p. 1856, 2018.
- SHORROCKS, V. M. The occurrence and correction of boron deficiency. **Plant and Soil**, v. 193, n. 1, p. 121–148, 1997.

SORATTO, R. P.; PEREIRA, M.; COSTA, T. A. M.; LAMPERT, V. N. Sidedressing nitrogen alternative sources and rates on out-of-season corn after soybean. **Revista de Ciências Agrônômicas**, v. 41, n. 4, p. 511–518, 2010.

SUN, A.; GOU, D.; DONG, Y.; XU, Q.; GUANGJIE, C. Extraction and Analysis of Available Boron Isotopes in Soil Using Multicollector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 67, n. 25, p. 7183–7189, 2019.

SUTRADHAR, A. K.; KAISER, D. E.; BEHNKEN, L. M. Soybean response to broadcast application of boron, chlorine, manganese, and zinc. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 3, p. 1048–1059, 2017.

TAKANO, J.; MIWA, K.; FUJIWARA, T. Boron transport mechanisms: collaboration of channels and transporters **Trends in Plant Science**, v. 13, n. 8, p. 451–457, 2008.

TANAKA, M.; FUJIWARA, T. Physiological roles and transport mechanisms of boron: perspectives from plants. **European Journal of Physiology**, v. 456, n. 4, p. 671–677, 2008.

TEKRONY, D. M. Precision is na essential component in seed vigor testing. **Seed Science and Technology**, v. 31, n. 2 p. 435–447, 2003.

TOLEDO, F. F.; NOVEMBRE, A. D. L. C.; CHAMMA, H. M. C. P.; MASCHIETTO, R. W. Vigor de sementes de milho (*Zea mays* L.) avaliado pela precocidade de emissão da raiz primária. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 1, p. 191–196, 1999.

TRONCHET, M.; BALAGUÉ, C.; KROJ, T.; JOUANIN, L.; ROBY, D. Cinnamyl alcohol dehydrogenases-C and D, key enzymes in lignin biosynthesis, play an essential role in disease resistance in Arabidopsis. **Molecular Plant Pathology**, v. 11, n. 1, p. 83–92, 2010.

VANHOLME, R.; DEMEDTS, B.; MORREEL, K.; RALPH, J.; BOERJAN, W. Lignin Biosynthesis and Structure. **Plant Physiology**, v. 153, n. 3, p. 895-905, 2010.

WANG, N.; YANG, C.; PAN, Z.; LIU, Y.; PENG, S. Boron deficiency in woody plants: Various responses and tolerance mechanism. **Frontiers in Plant Sciences**, v. 6, p. 916, 2015.

WARRINGTON, K. The effect of boric acid and borax on the broad bean and certain other plants. **Annals of Botany**, v. 37, n. 148, p. 629–672, 1923.

WREGGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JÚNIOR, C.; ALMEIDA, I. R. **Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2011.

WU, X.; RIAZ, M.; YAN, L.; DU, C.; LIU, Y.; JIANG, C. Boron deficiency in trifoliolate orange induces changes in pectin composition and architecture of components in root cell walls. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1882, 2017.

YERMIYAHU, U.; KEREN, R.; CHEN, Y. Boron sorption by soil in the presence of composted organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, n. 2, p. 405–409, 1995.

ZHOU, G.; SUN, X.; ZHANG, L.; ZENG, X.; LIU, G.; SHENG, O. Lignin metabolism plays an essential role in the formation of corky split vein caused by boron deficiency in 'Newhall' navel orange (*Citrus sinensis* Osb.) **Scientia Horticulturae**, v. 294, p. 110763, 2021.

ZHOU, X.; YUE, J.; YANGA, H.; ZHU, C.; ZHUA, F.; LI, J.; XUA, R.; GAO, J.; ZHOU, D.; DENG, X.; CHENGA, Y. Integration of metabolome, histochemistry and transcriptome analysis provides insights into lignin accumulation in oleocellosis-damaged flavedo of citrus fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. 172, p. 111362, 2021.