



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA FACULDADE DE AGRONOMIA
E MEDICINA VETERINÁRIA**

**RESPOSTAS A NUTRIÇÃO COM BORO PELAS CULTURAS DA
SOJA E MILHO EM FUNÇÃO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS
DE MANEJO EM SOLOS DO CERRADO**

BRUNO HENRIQUE VALE DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

**BRASÍLIA-DF
MARÇO/2025**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM AGRONOMIA FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA
VETERINÁRIA**

**RESPOSTAS A NUTRIÇÃO COM BORO PELAS CULTURAS DA
SOJA E MILHO EM FUNÇÃO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS
DE MANEJO EM SOLOS DO CERRADO**

BRUNO HENRIQUE VALE DOS SANTOS

ORIENTADOR: DR. JOSÉ RICARDO PEIXOTO

COORIENTADOR: DR. RAFAEL DE SOUZA NUNES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

**BRASÍLIA-DF
MARÇO/2025**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA FACULDADE DE AGRONOMIA
E MEDICINA VETERINÁRIA**

**RESPOSTAS A NUTRIÇÃO COM BORO PELAS CULTURAS DA
SOJA E MILHO EM FUNÇÃO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS
DE MANEJO EM SOLOS DO CERRADO**

BRUNO HENRIQUE VALE DOS SANTOS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO
EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM AGRONOMIA.**

APROVADO POR:

JOSÉ RICARDO PEIXOTO

Professor Doutor, Universidade de Brasília – UnB

CPF: 354.356.236-34

Examinador/email: peixoto@unb.br

JOSÉ DE OLIVEIRA CRUZ

Professor Doutor, Universidade de Brasília – UnB

CPF: 036.846.763-57

Examinador/email: jose.cruz@unb.br

THOMAZ ADOLPHO REIN

Pesquisador Doutor, EMBRAPA Cerrados

CPF: 027.990.018-07

Examinador/email: thomaz.rein@embrapa.br

**BRASÍLIA-DF
MARÇO/2025**

FICHA CARTOGRÁFICA

Santos, Bruno Henrique Vale dos

Respostas a nutrição com boro pelas culturas da soja e milho em função de diferentes estratégias de manejo em solos do cerrado; orientação: José Ricardo Peixoto; co-orientação: Rafael de Souza Nunes

101p. ; il.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília /Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2025.

1. Fontes de Boro 2. Fertilização com boro 3. Cerrado 4. Nutrição de cultivos 5. Fertilidade do solo

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS,B.H.V. RESPOSTAS A NUTRIÇÃO COM BORO PELAS CULTURAS DA SOJA E MILHO EM FUNÇÃO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE MANEJO EM SOLOS DO CERRADO. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2025, 101p. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: BRUNO HENRIQUE VALE DOS SANTOS

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Respostas a nutrição com boro pelas culturas da soja e milho em função de diferentes estratégias de manejo em solos do cerrado

GRAU: Mestre ANO: 2025

É concedida à Universidade de Brasília de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Bruno Henrique Vale dos Santos

CPF 069795551-62

Rua Copaíba, lote 01, Residencial Rosely Gonçalves, Águas Claras.

CEP: 71919-540 Brasília - DF

(61) 991391886 e brunohenriquemgrower@gmail.com

*Dedico,
À Deus, criador de todas as coisas visíveis
e invisíveis e fonte da verdadeira sabedoria.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, pelo dom da vida, por mais esta oportunidade e acima de tudo agradecê-lo por me amar tanto.

Ao amor da minha vida, minha esposa Kézia Barros Vale Oliveira por todo o carinho, amizade e amor que temos compartilhado por estes anos. Agradeço a Deus todos os dias por ter você ao meu lado. Palavras não seriam suficientes para descrever o quanto você me faz bem, obrigado por tudo. Te amo!

À minha querida mãe Adriana por sempre ter estado ao meu lado e por sempre me incentivar a dar um passo a mais em busca dos meus sonhos. Que Maria, nossa mãe e mãe de Deus siga intercedendo em nossas vidas.

Ao meu pai Rogério por todos os momentos em que me ensinou os verdadeiros valores da vida e que hoje me fazem ser quem sou. Obrigado por ser meu exemplo de honestidade e trabalho duro. Obrigado por sempre ter me incentivado a estudar.

Aos meus irmãos Rodrigo e Letícia, ser o irmão mais velho e ver vocês crescerem foi um privilégio, obrigado pela força que sempre me deram.

À minha grande família, por tudo. Em especial aos meus avós, Maria de Conceição e Antônio da Silva, Maria Irene Fernandes (in memoriam) e Antônio Natalino dos Santos (in memoriam).

Aos meus tios, Mayara, Cristiano e minha madrinha Maria de Jesus. Aos meus sogros, cunhados e primos, muito obrigado.

Aos amigos que fiz durante essa jornada, com vocês o caminho é a melhor parte dessa aventura. Em especial aos meus companheiros de graduação e hoje companheiros para a vida Antônio Carlos, Luan Vinícius e Eduardo Fernandes.

Ao meu orientador Professor Dr. José Ricardo Peixoto, por ter sido o primeiro a me apresentar o fascinante mundo da nutrição de plantas. Obrigado por todos os ensinamentos transmitidos por estes anos.

Ao meu coorientador e amigo Dr. Rafael de Souza Nunes, agradeço por tudo que tem me ensinado. Obrigado por ter me transmitido o amor pela fertilidade do solo e nutrição de plantas e por todos os momentos compartilhados até aqui.

À todo o time da Grower Conhecimento Agronômico e em especial a toda a equipe de fertilidade e nutrição de plantas, aprender com vocês todos os dias é um privilégio.

À todas as estações de pesquisa que permitiram a condução deste estudo, APBC – Associação de Pesquisa Brasil Central, Smart Agrotech, Cerrado consultoria e GAPES – Grupo Associado de Pesquisa do Sudoeste Goiano.

Ao Professor Dr. José de Oliveria Cruz, pela imensa contribuição na avaliação deste trabalho e pela participação na banca.

Ao pesquisador Thomaz Adolpho Rein pela participação e contribuições na banca de avaliação e todas suas contribuições para melhoria da qualidade deste trabalho.

À Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária por todos os recursos que foram disponibilizados durante a minha formação, muito obrigado pela oportunidade.

À todos que participaram da minha formação acadêmica e pessoal, palavras não seriam suficientes para agradecer. Muito obrigado!

TÍTULO: RESPOSTAS A NUTRIÇÃO COM BORO PELAS CULTURAS DA SOJA E MILHO EM FUNÇÃO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE MANEJO EM SOLOS DO CERRADO

RESUMO

O máximo potencial agronômico no cultivo da soja (*Glycine max* L.) e milho (*Zea mays* L.) dependem da interação entre fatores relacionados ao ambiente produtivo, a genética e a fertilidade do solo. Em solos tropicais altamente intemperizados, como os do Cerrado, os baixos teores naturais de boro podem limitar a produtividade, tornando sua suplementação nutricional uma estratégia essencial. O objetivo deste trabalho foi estudar os potenciais de resposta das culturas da soja e do milho a doses crescentes de B, o comportamento de cada fonte nos diferentes cenários e como a manutenção das aplicações anuais de B em solos de textura argilosa, textura média e arenosa contrastam em relação as aplicações espaçadas bi/trienalmente. Este estudo, conduzido em quatro condições edafoclimáticas distintas nos municípios de Rio Verde, Catalão, Jaborandi e Cristalina nos estados do Goiás e Bahia, avaliou a resposta da soja e milho à aplicação de boro a partir de quatro fontes de naturezas químicas distintas o ácido bórico, a ulexita, o tetraborato de sódio e o octaborato de sódio, com doses anuais variando de 0,5 a 2 kg ha⁻¹ de B e estratégias de reaplicação bienal e trienal com doses variando entre 2 a 6 kg ha⁻¹ de B. Os experimentos foram conduzidos em delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial entre as safras de 2018/19 e 2023/24 e em cultivos de inverno entre 2019 e 2023 na unidade de Rio Verde. Os resultados indicaram que a suplementação com boro aumentou significativamente a produtividade de soja, com ganhos médios de 5,97 sc ha⁻¹ em 13 cultivos avaliados e ganhos médios de 24,8 sc ha⁻¹ pela cultura do milho. As curvas de resposta das doses anuais e a eficiência das fontes foram influenciadas pelas características texturais de cada solo. Em cada uma das estações experimentais na maior parte dos cultivos as fontes diferiram entre si, ano a ano e no acumulado geral de todos os anos. Além da influência no rendimento da cultura da soja, a nutrição com boro foi capaz de modular positivamente o status nutricional das plantas e caracteres produtivos como massa seca de raízes e peso de mil grãos. A reaplicação anual de boro mostrou-se superior às estratégias de fornecimento esparsa (bienal e/ou trienal) nas produtividades acumuladas das unidades de solo de textura argilosa, média e arenosa destacando a importância dessa abordagem para maximizar os rendimentos da soja e milho em sistemas produtivos tropicais.

Palavras-chave: fertilização com boro, fontes de boro, solo tropical.

ABSTRACT

The maximum agronomic potential in the cultivation of soybean (*Glycine max* L.) and maize (*Zea mays* L.) depends on the interaction between factors related to the production environment, genetics, and soil fertility. In highly weathered tropical soils, such as those in the Cerrado, low natural boron levels can limit productivity, making its nutritional supplementation an essential strategy. This study aimed to investigate the response potentials of soybean and maize to increasing B doses, the behavior of each source under different scenarios, and how the maintenance of annual B applications in clayey, medium-textured, and sandy soils contrasts with spaced applications. Conducted in four distinct edaphoclimatic conditions in the municipalities of Rio Verde, Catalão, Jaborandi, and Cristalina, in the states of Goiás and Bahia, this study evaluated the response of soybean and maize to boron application using four sources of different chemical natures: boric acid, ulexite, sodium tetraborate, and sodium octaborate. Annual doses ranged from 0.5 to 2 kg ha⁻¹ of B, while biennial and triennial reapplication strategies varied from 2 to 6 kg ha⁻¹ of B. The experiments were conducted in a randomized block design in a factorial scheme between the 2018/19 and 2023/24 growing seasons, with winter crops between 2019 and 2023 in the Rio Verde unit. The results indicated that boron supplementation significantly increased soybean productivity, with average gains of 5.97 sc ha⁻¹ across 13 evaluated crops, and average gains of 24.8 sc ha⁻¹ for maize. The response curves to annual doses and the efficiency of the sources were influenced by the textural characteristics of each soil. In most growing seasons at each experimental station, the sources differed from one another year by year and in the overall accumulation of all years. In addition to its influence on soybean yield, boron nutrition positively modulated the nutritional status of plants and productive traits such as root dry mass and thousand-grain weight. Annual boron reapplication proved superior to sparse supply strategies (biennial and/or triennial) in the accumulated yields of clayey, medium-textured, and sandy soils, highlighting the importance of this approach for maximizing soybean and maize yields in tropical production systems.

Key words: boron fertilization, boron sources, tropical soil.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. PRODUÇÃO AGRÍCOLA NO CERRADO BRASILEIRO.....	3
2.2. BORO NA PLANTA.....	4
2.3. BORO NO SOLO.....	8
2.4. FONTES DE BORO	15
3. OBJETIVOS.....	17
3.1. OBJETIVO GERAL.....	17
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3.3. HIPÓTESES.....	17
4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	18
1. INTRODUÇÃO.....	30
2. MATERIAL E MÉTODOS	32
2.1. LOCALIDADES EXPERIMENTAIS.....	32
2.2. TRATAMENTOS E DELINEAMENTOS	38
2.3. AVALIAÇÕES DO EXPERIMENTO	43
3. RESULTADOS	46
3.1. ESTUDO DE RESPOSTAS A NUTRIÇÃO COM BORO PELA CULTURA DA SOJA A PARIR DE DOSES ANUAIS.....	46
3.2. ESTUDO DE RESPOSTAS A NUTRIÇÃO COM BORO PELA CULTURA DA SOJA POR DIFERENTES FONTES.....	48
3.3. RESPOSTAS A NUTRIÇÃO RESIDUAL COM BORO PELA CULTURA DO MILHO POR DIFERENTES FONTES EM DOSES ANUAIS	56
3.4. EFEITO DA NUTRIÇÃO COM BORO NOS PARÂMETROS PRODUTIVOS E NO STATUS NUTRICIONAL DA CULTURA DA SOJA	59
3.5. EFEITOS DAS ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO ANUAIS E BI/TRIENAS DE BORO NO SISTEMA.....	64
4. DISCUSSÃO.....	71
5. CONCLUSÕES	81
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localidades Experimentais dispostas nos estados de Goiás e Bahia. A esquerda mapa do Brasil com o estado de Goiás e Bahia destacados e a direita em detalhe a localização das 4 unidades experimentais no município de Rio Verde, Catalão, Cristalina e Jaborandi nos estados de GO e BA.	33
Figura 2. Temperatura e precipitação média da região de Rio Verde no estado do Goiás entre as safras de 2018/19 e 2022/23. Fonte: INMET, 2024.	34
Figura 3. Temperatura e precipitação média da região de Catalão no estado do Goiás entre as safras de 2019/20 e 2021/22. Fonte: INMET, 2024.	36
Figura 4. Temperatura e precipitação média da região de Cristalina no estado do Goiás entre as safras de 2022/23 e 2023/24. Fonte: INMET, 2024.	37
Figura 5. Temperatura e precipitação média da região de Jaborandi no estado da Bahia entre as safras de 2021/22 e 2023/24. Fonte: INMET, 2024.	38
Figura 6. (A) Produtividade média de soja com (área escura na figura) e sem (área clara na figura) aplicação de boro a partir de doses anuais de B variando entre 0,5 e 2 kg de B ha ⁻¹ via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em 4 locais experimentais ao longo de 13 cultivos e ganhos em relação a controle médio dos tratamentos (linha pontilhada – eixo y auxiliar) e (B) produtividade média das doses anuais e controle sem B. Letras minúsculas correspondem a diferenças para a média dos tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	46
Figura 7. Produtividade média de soja (sc ha ⁻¹) do controle e de doses anuais de B de 0,5, 1 e 2 kg ha ⁻¹ via ácido bórico, octaborato, tetraborato e ulexita para a média das localidades e para os agrupamentos texturais. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as doses para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	47
Figura 8. Produtividade média de soja (sc ha ⁻¹) a partir de doses anuais de B de 0,5, 1 e 2 kg de B ha ⁻¹ via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em 4 locais experimentais ao longo de 13 cultivos. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	48
Figura 9. (A) Produtividade média de soja (sc ha ⁻¹) a partir de doses anuais de B variando entre 0,5 e 2 kg de B ha ⁻¹ via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em Rio Verde-GO aplicadas no verão de cada ano. Barras empilhadas mostram produtividades médias das fontes nos cultivos de verão (soja) ao longo dos cultivos. (B) Produtividade médias das fontes e do controle ao longo dos cultivos. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	49

Figura 10. (A) Produtividade média de soja (sc ha^{-1}) a partir de doses anuais de B variando entre 0,5 e 2 kg de B ha^{-1} via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em Catalão-GO e (B) Produtividade médias das fontes e do controle ao longo dos cultivos. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras empilhadas mostram produtividades médias das fontes nos cultivos de verão (soja) ao longo dos cultivos.	50
Figura 11. Produtividade média de soja (sc ha^{-1}) a partir de doses anuais de B variando entre 0,5 e 2 kg de B ha^{-1} via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em Jaborandi-BA. Barras empilhadas mostram produtividades médias das fontes nos cultivos de verão (soja) ao longo dos cultivos. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	51
Figura 12. Produtividade média de soja (sc ha^{-1}) a partir de doses anuais de B variando entre 0,5 e 2 kg de B ha^{-1} via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em Cristalina-GO. Barras empilhadas mostram produtividades médias das fontes nos cultivos de verão (soja) ao longo dos cultivos. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	52
Figura 13. Curvas médias de resposta a doses anuais (0,5, 1 e 2 kg de B ha^{-1}) pela cultura da soja (sc ha^{-1}) em 13 cultivos via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita nas estações de Rio Verde, Catalão, Jaborandi e Cristalina. (A) ácido bórico, (B) octaborato de sódio, (C) tetraborato de sódio e (D) ulexita. ** significativo a 0,01% de probabilidade pelo teste F.	53
Figura 14. Curvas de resposta em produtividade de soja (sc ha^{-1}) a partir de 4 fontes de boro: ácido bórico (ACB), octaborato de sódio (OCT), tetraborato de sódio (TET) e ulexita (ULX) a partir de doses anuais de 0,5, 1 e 2 kg de B ha^{-1} . (A) Média locais, (B) Textura Argilosa, (C) Textura Média e (D) Textura arenosa. Linhas contínuas representam as equações das regressões polinomiais de cada uma das fontes. (***) $p < 0,001$ e (**) $p < 0,01$ significativo pelo teste F.	55
Figura 15. (A) Produtividade média de milho com (área escura na figura) e sem (área clara na figura) aplicação de boro a partir de doses anuais (Com B) de B variando entre 0,5 e 2 kg de B ha^{-1} via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em 4 locais experimentais ao longo de 13 cultivos e ganhos em relação a controle (Sem B) médio dos tratamentos (linha pontilhada – eixo y auxiliar) e (B) produtividade média das doses anuais e controle sem B. Letras minúsculas correspondem a diferenças para a média dos tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	57

Figura 16. (A) Produtividade média de milho (sc ha ⁻¹) a partir de doses anuais de B variando entre 0,5 e 2 kg de B ha ⁻¹ via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em Rio Verde-GO aplicadas no verão de cada ano. Barras empilhadas mostram produtividades médias das fontes nos cultivos de inverno (milho) ao longo dos cultivos. (B) Produtividade média das fontes e do controle ao longo dos cultivos. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das fontes pelo teste de Tukey (p < 0,05).	58
Figura 17. Produtividade média anual de milho (sc ha ⁻¹) em doses anuais de B aplicadas via ácido bórico (A), octaborato de sódio (B), tetraborato de sódio (C) e ulexita (D) em doses anuais de 0,5, 1 e 2 kg de B ha ⁻¹ . Linhas contínuas representam as equações das regressões polinomiais de cada uma das fontes. ** significativo a 0,01% de probabilidade pelo teste F.	59
Figura 18. Massa seca de raízes soja (g/planta) na dose de 2 kg de B ha ⁻¹ fornecidas por 4 diferentes fontes de boro a partir do fornecimento de 2 kg ha ⁻¹ na estação de Catalão-GO. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey (p < 0,05).	60
Figura 19. Coeficiente de correção de Pearson entre os teores foliares de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn. A intensidade da cor, seja alta ou baixa, reflete a força da relação entre um par de elementos, com tons azuis indicando correlações positivas e tons vermelhos representando correlações negativas. Quanto mais próximo de um for o valor, mais forte será a correlação, enquanto valores próximos de zero indicam uma relação mais fraca entre as variáveis. Os símbolos * p < 0,05 e ** p < 0,01 demonstram a significância estatística da correlação entre os pares de características analisadas.	61
Figura 20. (A) Peso de mil grãos de soja (g mil grãos ⁻¹) em resposta a diferentes fontes de boro (ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita) na safra 2023/24 na estação de Jaborandi-BA e (B) Efeito da nutrição com boro no peso de mil grãos. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey (p < 0,05).	62
Figura 21. Peso de mil grãos de soja em resposta a diferentes doses (0,5, 1 e 2 kg de B ha ⁻¹) e a partir de 4 fontes de boro (ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita) entre os cultivos de 2019/20, 2020/21 e 2021/22 na estação de Catalão-GO. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey (p < 0,05).	63
Figura 22. Produtividade média anual (sc ha ⁻¹) no sistema soja milho em doses anuais e bienais (a) e anuais e trienais (b). Produtividade acumulada ao longo de 5 cultivos de soja e milho (c)	

na estação de Rio Verde-GO. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	64
Figura 23. Produtividade média anual de soja ($sc\ ha^{-1}$) em anuais e trienais (A). Produtividade acumulada ao longo de 3 cultivos de soja (B) na estação de Catalão-GO. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	65
Figura 24. Produtividade média anual de soja ($sc\ ha^{-1}$) em anuais e bienais (A). Produtividade acumulada ao longo de 2 cultivos de soja (B) na estação de Jaborandi-BA. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	66
Figura 25. Produtividade média anual de soja ($sc\ ha^{-1}$) em anuais e trienais (A). Produtividade acumulada ao longo de 3 cultivos de soja (B) na estação Jaborandi-BA. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	66
Figura 26. Produtividade média anual ($sc\ ha^{-1}$) em anuais e bienais (A). Produtividade acumulada ao longo de 2 cultivos de soja (B) em Cristalina-GO. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	67
Figura 27. Diferença de produtividade entre a aplicação anual e tri/bienal de B nos anos subsequentes a aplicação inicial ($sc\ ha^{-1}$). Os intervalos de efeito residual após a aplicação da dose trienal são representados pelos marcadores vermelhos e para os blocos bienais pelos marcadores pretos.	68
Figura 28. Teor de B (ppm) em profundidade (m) a partir da aplicação de diferentes fontes na estação de Rio Verde-GO após 6 cultivos, 3 cultivos de verão de soja e 3 cultivos de inverno de milho. (A) Teores de B em profundidade de doses anuais e trienais, (B) Teores de Bem profundidade de doses anuais de B e (C) Teores de B em profundidade de doses trienais de B. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Descrição de cultivos por estação experimental entre as safras de 2018/19 e 2023/24.	33
Tabela 2. Análise química do solo antes da implantação do experimento em Rio Verde-GO.	34
Tabela 3. Análise química do solo antes da implantação do experimento em Catalão-GO. ...	35
Tabela 4. Análise química do solo antes da implantação do experimento em Cristalina-GO.	36
Tabela 5. Análise química do solo antes da implantação do experimento em Jaborandi-BA.	37
Tabela 6- Descrição das fontes de boro utilizadas nos experimentos.....	39
Tabela 7. Descrição dos tratamentos relativos as aplicações anuais de boro. Controle sem a aplicação de boro e 4 fontes com aplicações de 0,5, 1 e 2 kg de boro por hectare anualmente.	40
Tabela 8. Descrição dos tratamentos relativos as estratégias de reaplicação de boro em Rio Verde-GO. Estratégia de aplicação, fonte de boro utilizada, dose global aplicada (B. kg ha ⁻¹) e anos de aplicação de cada dose. (-) sem ano experimental, 0= sem aplicação de boro.....	41
Tabela 9. Descrição dos tratamentos relativos as estratégias de reaplicação de boro em Catalão-GO. Estratégia de aplicação, fonte de boro utilizada, dose global aplicada (B. kg ha ⁻¹) e anos de aplicação de cada dose. 0 = sem aplicação de boro.....	42
Tabela 10. Descrição dos tratamentos relativos as estratégias de reaplicação de boro em Jaborandi-BA. Estratégia de aplicação, fonte de boro utilizada, dose global aplicada (B. kg ha ⁻¹) e anos de aplicação de cada dose. 0 = sem aplicação de boro.	42
Tabela 11. Descrição dos tratamentos relativos as estratégias de reaplicação de boro em Cristalina-GO. Estratégia de aplicação, fonte de boro utilizada, dose global aplicada (B. kg ha ⁻¹) e anos de aplicação de cada dose. 0 = sem aplicação de boro.	43
Tabela 12 - Índices de eficiência agrônômica para as fontes em aplicações anuais de boro em relação a fonte referência ácido bórico.....	56
Tabela 13 - Tabela de Valores de Pr>Fc e CV (%) para Significância Estatística a partir da ANOVA para interações nas estratégias de reaplicação.	69

1. INTRODUÇÃO GERAL

O sucesso na condução de uma atividade agrícola está diretamente relacionado a um conjunto de fatores ligados ao solo, ao clima e ao manejo realizado ao longo do desenvolvimento da cultura, fatores estes que vão se relacionar a fim de promoverem condições favoráveis a expressão do máximo potencial produtivo dos cultivos. Dentre estes fatores, a nutrição de plantas tem tomado destaque pois, grande parte das áreas cultivadas no país apresentam solos distróficos com limitações ao desenvolvimento das plantas.

Atualmente a produção agrícola no Cerrado brasileiro é responsável por mais da metade de tudo que é produzido no país, contrastando com um passado de produção agropecuária de baixa tecnologia. A intensa expansão da área cultivada e da diversificação de espécies nas savanas brasileiras está diretamente relacionada ao desenvolvimento e aplicação de técnicas de correção do solo e fornecimento de nutrientes (CONAB, 2024).

O processo formação dos solos tropicais do Cerrado brasileiro, caracterizado pela intensa ação dos fatores do intemperismo, favorece com que nestas regiões do globo os solos apresentem características como, elevada acidez e baixa disponibilidade natural de elementos essenciais que comprometem o desenvolvimento das culturas agrícolas. Dessa forma, práticas agrícolas que moldem as características químicas do solo através da correção da acidez e do fornecimento de elementos essenciais através da adubação, o tornam propício a expressão do máximo potencial das culturas Novais et al. (2007).

Nas condições de solo da grande maioria das áreas agrícolas, mais especificamente na faixa de pH que é trabalhado o solo, a maior porção do boro contido na solução na forma de ácido bórico (H_3BO_3), sem carga e passível ser perdido por lixiviação. Sendo o boro um elemento essencial ao desenvolvimento das plantas, participando de processos morfológicos e fisiológicos sem os quais a cultura não completa seu ciclo de vida, e a luz de que os solos do Cerrado apresentam concentrações do elemento abaixo do nível ideal para a boa nutrição dos cultivos em sua grande maioria, abre-se uma grande oportunidade de se avaliar o efeito da nutrição com boro sobre a produtividade das culturas agrícolas.

Diante disto, este trabalho tem o objetivo avaliar o efeito da nutrição com boro na produtividade e nos componentes de produção da cultura da soja a partir de diferentes dosagens

do elemento, fornecidas por diferentes fontes aplicadas a lanço com diferentes estratégias de reaplicação em 4 regiões produtoras de grãos do país.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. PRODUÇÃO AGRÍCOLA NO CERRADO BRASILEIRO

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro e o sucesso do desenvolvimento agrícola do país se deve ao avanço da agricultura nos mais de 2 milhões de quilômetros quadrados de área total e com mais de 50% da área apta para a agricultura. Na região do cerrado a precipitação anual varia de 900 a 2000 mm, o que representa a possibilidade de cultivo de duas safras não irrigadas em grande parte da região no verão/outono e com a presença de uma estação seca compreendendo a estação do inverno. No tocante a temperatura, a região apresenta médias diferenciadas para as regiões ao norte e ao sul com médias anuais de 27°C e 22°C, respectivamente. Nas regiões tropicais do globo, os agentes do intemperismo atuaram de forma incisiva para construção dos solos característicos da região, os Latossolos (46%), Argissolos (15%) e Neossolos Quartzarênicos (15%) e com isto na região temos a predominância de solos com baixa fertilidade natural e altamente ricos em óxi-hidróxidos de Fe e Al, características estas que conferem um ambiente desafiador ao desenvolvimento das plantas cultivadas, pela alta acidez destes solos (Goedert, 1989; Lopes; Guilherme, 1994).

No passado a região era caracterizada por ser destinada principalmente a práticas de pecuária extensiva, cultivo de arroz e produção de carvão vegetal. Atualmente são cultivados cerca de 38,5 milhões de hectares na região. Este avanço nos últimos anos se deve à inserção de tecnologias que permitiram os cultivos das mais diferentes espécies na região, que hoje é responsável por cerca de 62,3% da produção nacional de soja e segundo dados do CEPEA, (2023) a agricultura brasileira é responsável por 24,8 do PIB nacional (EMBRAPA, 2021).

A soja (*Glycine max* L.) é a principal espécie cultivada durante a safra de verão no Brasil, sendo a oleaginosa de maior relevância econômica no país. De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), a área plantada na safra 2024/25 atingiu 47,36 milhões de hectares, representando um incremento de 2,6% em relação ao ciclo anterior. Pertencente à família Fabaceae, a espécie desempenha um papel estratégico tanto na alimentação humana quanto na nutrição animal, além de ser uma importante matéria-prima para a indústria de biocombustíveis e produtos derivados de proteína vegetal.

O milho (*Zea mays* L.) destaca-se como a principal cultura da safra de inverno nas regiões produtoras do Brasil, com uma área cultivada estimada em 17 milhões de hectares,

conforme dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024). Este cereal possui ampla importância global, sendo fundamental tanto para a alimentação humana quanto para a produção de ração animal. Pertencente à família Poaceae, o milho apresenta metabolismo fotossintético C4, conferindo-lhe alta eficiência no uso da radiação solar e grande adaptação a regiões tropicais. Apesar de seu elevado potencial produtivo, a média nacional ainda é considerada baixa, principalmente devido a fatores tecnológicos e edafoclimáticos. Para a safra de inverno 2025/26, as projeções indicam um incremento de 4,1% na produtividade, segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025).

2.2. BORO NA PLANTA

O boro é um nutriente essencial ao desenvolvimento das plantas, fato este que indica a participação direta deste elemento em processos fundamentais no metabolismo vegetal. A categorização dos nutrientes ditos essenciais, parte dos critérios de essencialidade propostos por Arnon e Stout, (1939) que adotam como critérios a participação direta do elemento em processos fisiológicos do metabolismo da planta, a expressão de sintomas específicos de deficiência que apenas são superados com o retorno do suprimento do elemento e que caso não ocorra a planta não complete seu ciclo.

A essencialidade do boro foi demonstrada por Warington, (1923), em experimento realizado com Feijão fava da variedade *Sutton's Prolific Longpod* avaliando a influência de diferentes concentrações de ácido bórico na solução. Juntamente com zinco são entre os micronutrientes, os que mais limitam a produtividade das culturas no Brasil e este fato pode ser explicado pelos baixos teores naturais de B em nossos solos o que está relacionado com o processo de formação, resultado de milhões de anos de intemperismo resultando na destruição de minerais primários e lixiviação de grande parte dos nutrientes considerados essenciais ao desenvolvimento das plantas (Engler et al., 2006).

O elemento participa de atividades estruturais e fisiológicas no metabolismo vegetal, de forma direta e insubstituível, sem as quais a planta não pode completar seu ciclo vital. Estruturalmente foi demonstrado que o boro participa dos processos de formação de novos tecidos sendo relacionado aos processos de divisão celular nos meristemas, atuando também juntamente com o cálcio no processo de estruturação e estabilidade das paredes celulares como demonstrado por Rosolem e Leite, (2007) nas variedades de café Catuaí e Mundo novo e na

formação de complexos rhamnoga-lacturonan-II-B (RG-II-B) que atuam na manutenção da estabilidade das ligação de pectina e na regularidade do tamanho dos poros nas paredes celulares.

A participação do boro nos processos de formação das paredes celulares é sustentada pela maior concentração de B nas paredes celulares, cerca de 80-90% de todo o boro das plantas está presente nas paredes celulares. Esta relação entre o boro e a estabilidade das membranas parece se correlacionar com atuação do nutriente nos processos de translocação de fotoassimilados entre as fontes e drenos na planta, diversos trabalhos demonstraram que esta atuação pode estar relacionada com a capacidade de formação de compostos de boro ligados a carboidratos, os chamados de complexo boro-açúcar ionizável que facilita o transporte dos carboidratos através das membranas vegetais, deste modo é comum encontrar concentrações elevadas de açúcar em folhas de plantas com deficiência de B (Pommerrenig; Eggert; Bienert, 2019; Shireen et al., 2018).

A atuação do boro nos estádios reprodutivos está relacionada aos processos de germinação e crescimento do tubo polínico e das estruturas reprodutivas, deste modo Archana e Pandey, (2021) observaram efeitos positivos do suprimento de boro na viabilidade, produção e tamanho de grãos de pólen na cultura do girassol, o que corrobora com os resultados de Sharafi e Raina, (2021) que observaram em *Malus domestica L.*, um aumento na germinação do grão de pólen na concentração de 1000mg/L de B após 72 e 120 horas de tratamento quando comparadas com o controle, também e Peñaloza e Toloza, (2018) observaram respostas positivas a fertilização foliar com boro no que tange a qualidade do pólen e a capacidade de desenvolvimento do tubo polínico e fecundação em *C. annuum L.*. Na cultura do trigo Galvão e Sousa (1988) observaram redução da esterilidade masculina (chochamento de grãos) em 88% e aumento da produtividade promovidos pela aplicação de boro nas doses de 0,6 e 1,2 kg/ha em solo orgânico de várzea.

Atualmente, além da participação direta no metabolismo das plantas, alguns trabalhos demonstraram que plantas bem supridas de boro tendem a tolerar melhor problemas relacionados a toxidez por alumínio. Dentro desse âmbito Wu et al. (2017) observaram que o boro pode atuar diminuindo os sítios de absorção do alumínio, aumentando as concentrações de prolina nas células, além da alta relação com a atividade de diversas enzimas relacionadas a respostas aos estresses oxidativos, principalmente por espécies reativas de oxigênio, resultados estes que vão de encontro aos resultados recentes de outros autores. A suplementação foliar com

B e Ca na cultura da soja representa ganhos no rendimento da cultura devido ao aumento na eficiência do processo fotossintético e pela importância dos dois nutrientes no processo reprodutivo (Galeriani et al., 2022). Bhadra et al. (2023) analisaram o efeito da nutrição com boro e zinco na tolerância a podridão causada por *A. rolfsii* e observaram aumentos nos teores de clorofila total nas folhas das plantas de beterraba sacarina além da ativação de vias específicas do metabolismo oxidativo relacionadas a produção de enzimas como catalase (CAT), peroxidase (POX), ascorbato peroxidase (APX) e compostos antioxidantes como o ácido ascórbico (Ge et al., 2023; Riaz et al., 2018).

As concentrações de B no tecido vegetal devem permanecer entre 20-70 mg kg⁻¹ para eudicotiledôneas e dentro do intervalo estreito entre a faixa adequada e tóxica. Em condições de elevadas concentrações do elemento na solução do solo podem ser observadas mudanças morfológicas no desenvolvimento vegetal, como observado por Arredondo e Bonomelli, (2023) em folhas maduras de cereja *Prunus avium*, que apresentavam manchas cloróticas e necróticas, além de sintomas visuais de toxidez na estrutura dos tecidos foliares, com formas irregulares e desidratadas, prejuízo no desenvolvimento de raízes e efeitos negativos em parâmetros fisiológicos ligados a eficiência fotossintética com concentrações de 3.75 mg/dm³ de B, resultados estes que também foram discutidos por García-Sánchez et al. (2020) e que indicaram possíveis interações ambientais entre os sintomas de deficiência e toxidez de boro (Bergmann, 1992; Brdar-jokanović, 2020).

A absorção de boro pela planta ocorre na grande maioria dos casos na sua forma de ácido bórico e em condições específicas de pH elevado pode ocorrer a absorção da forma borato. Esta característica faz com que o processo de absorção seja passiva em concentrações altas do elemento na solução do solo e que rapidamente exista um equilíbrio entre a concentração do elemento nas raízes e na solução do solo. Já em condições de baixas concentrações do elemento alguns transportadores como o NIP-5.1 foram descritos na atuação de absorção do elemento (Hayes e Reide, 2004; Takano et al., 2006; Reide, 2014).

Os sintomas de toxidez por boro podem estar relacionados a situações de alta taxa transpiratória, a alta concentração de B na solução do solo além da disponibilidade de água, fatores estes que tem correlação com o processo de absorção do boro pela planta e com a tolerância da espécie a níveis elevados de B. Geralmente, os sintomas estão associados a clorose marginal dos tecidos e posterior necrose devido a alterações em um grande número de processos fisiológicos como aumento da oxidação de lipídeos, aumento da permeabilidade das

membranas, diminuição de exudação de prótons, deposição de suberina e lignina além de desbalanços nutricionais. A maior tolerância a altas concentrações de B na solução do solo por algumas culturas, pode ser explicada por mecanismos específicos ligados por exemplo, a alta capacidade de efluxo de B pela presença de transportadores, que removem o B das células (BOR) ou diminuem os canais de entrada (NIP 5 e PIP1). Além da atuação de transportadores outro mecanismo utilizado por espécies para aumentar a tolerância a elevadas concentrações de B foi descrito nas culturas de cevada e trigo, onde a elevada expressão de gene *Bor2-like* aumenta o bombeamento de B para o vacúolo das células, onde o elemento é menos tóxico e pode ser acumulado em quantidades maiores (Martínez-cuenca et al., 2015; Reid; Fitzpatrick, 2009; Shah et al., 2017; Simón et al., 2013).

Por outro lado, observam-se efeitos negativos da deficiência de B nos processos relacionados a eficiência da fixação biológica do nitrogênio, processo simbiótico realizado entre espécies de leguminosas e bactérias que permite a conversão do nitrogênio atmosférico (N_2) em amônia (NH_3^+), onde se observou uma diminuição do número de nódulos e prejuízo no desenvolvimento dos nódulos. Esta associação pode ser explicada pela atuação do boro na manutenção da integridade das paredes células (estrutura do nódulo), o que é estritamente relacionada com a atividade da nitrogenase, com o transporte de carboidratos para os nódulos, no processo de infecção além dos eventos de sinalização que antecedem o estabelecimento da simbiose (Bellaloui et al., 2014; Bolaños; Brewin; Bonilla, 1996).

O boro exerce papel importante na dinâmica de absorção de nutrientes pelas plantas, influenciando tanto de maneira sinérgica quanto. Um exemplo de interação positiva é com o fósforo, favorecendo sua absorção devido à modulação da atividade da enzima redutase. Além disso, o boro contribui para o funcionamento eficiente das H^+ -ATPases, o que melhora a entrada de potássio nas células e reduz as perdas desse nutriente por extravasamento dos tecidos além da influência direta do elemento no metabolismo do nitrogênio com relatos a nível de expressão gênica, influência do B em processos de transcrição de genes relacionados ao metabolismo do nitrato, como também por efeitos na fixação biológica do nitrogênio relacionados a biossíntese de nodulina (ENOD2) e pela estabilidade e funcionalidade da barreira contra difusão de O_2 (Vera-Maldonado et al., 2024).

As funções do elemento relacionadas a composição da parede celular têm estrita relação com os sintomas de deficiência em condições de baixos teores no tecido vegetal. Tipicamente em grande parte das espécies deformações nos tecidos foliares, redução de crescimento das

raízes e morte do meristema apical são relacionadas a deficiência do elemento, em espécies de baixa mobilidade os sintomas de deficiência são localizados em tecidos em novos (Hu, 1997). A mobilidade do elemento varia entre as espécies, sendo possível dividi-las em dois grandes grupos, o primeiro de mobilidade restrita ou baixa mobilidade e o segundo de alta mobilidade. Esta característica de mobilidade tem relação com o tipo de açúcar formado no processo de fotossíntese, sendo que em espécies que apresentam alta mobilidade o sorbitol, manitol ou dulcitol sejam os principais produtos fotossintéticos (Brown e Hu, 1996).

2.3. BORO NO SOLO

A disponibilidade de um nutriente é afetada por fatores relativos ao solo, ao clima, a fonte utilizada e ao manejo da área. No mundo as principais reservas de boro encontram-se em países de clima temperado e com baixos índices pluviométricos sendo que as principais reservas mundiais de B encontram-se nos Estados Unidos, Rússia, Austrália, China e Turquia que sozinha detêm de 75-80% da reserva global. No que tange a dinâmica do boro no solo, a literatura aborda a influência de fatores como pH, composição mineralógica do solo, teor de matéria orgânica, precipitação média da região e velocidade de disponibilização do nutriente para a planta pelas diferentes fontes de boro (Ozdemir et al., 2014). Durante o processo de intemperismo alguns fatores moldam a preferência dos cátions ao complexo sortivo ou CTC e isso pode ser ilustrado através da série liotrópica que leva em consideração a concentração do cátion na solução do solo, sua valência e sua densidade de carga. Porém no pH do solo, majoritariamente ácido em nosso país, o boro está em sua forma não ionizada/molecular $B(OH)_3$ com carga neutra e sendo passível de perdas imediatas por lixiviação. O pK desse ácido é de 9,24, sendo assim em condições naturais de pH ou no pH típico das áreas agrícolas do Brasil, não teremos grande concentração de sua forma dissociada (Gupta et al., 1985).

O potencial hidrogeniônico (pH) expressa a concentração ou atividade dos íons hidrogênio em uma solução descrita pela função inversa ao logaritmo natural da concentração de prótons H^+ na solução. Variações do pH tem mostrado efeito direto na adsorção de boro, onde a equação de Freundlich, na sua forma linear, se correlaciona de forma a traduzir os efeitos da concentração de B na solução de equilíbrio e do pH do solo nos processos de adsorção de B em 3 solos do município de Piracicaba no estado de São Paulo mostrando que diferentemente do que ocorre com outros ânions a adsorção de B aumenta com elevações dos valores do pH,

com decréscimo do processo de adsorção a partir do pH 8-8,5, que pode ser representado com uma curva em forma de sino, pelo aumento da concentração de hidroxilas na solução e da competição pelos sítios de adsorção como descrito por em outro trabalho avaliando os efeitos do pH nas reações de adsorção de boro no solo observaram que o modelo de Langmuir adequou-se para os valores de B adsorvido em diferentes valores de pH, além de observarem uma menor adsorção do B nas camadas superficiais que segundo os autores sugerem a existência de reações de adsorção específica entre óxi-hidróxidos de Fe e Al e as formas de B na solução do solo (Goldberg et al., 2005; Soares et al., 2008; Sims e Bingham, 1968).

O aumento do fenômeno de adsorção do boro com elevação dos valores de pH pode ser explicado pelo aumento da proporção de ânions borato B(OH)_4^- passíveis da formação de complexos de esfera interna e externa com as superfícies dos minerais e com a matéria orgânica do solo e do número de sítios de adsorção ativos, independentemente da carga líquida da superfície do colóide que ocorre com as espécies B(OH)_3^0 e B(OH)_4^- . Sá e Ernani, (2016) observaram diminuição da lixiviação de boro com aumento dos valores do pH através da prática da calagem em um Nitossolo Vermelho Distroférrico mostrando que as perdas por lixiviação em condições de pH= 4.6 foram 58% superiores as perdas quando o pH era igual a 6, o que é explicado pela diminuição da concentração de íons H^+ na solução do solo que permite a maior migração de ânions borato para os sítios de adsorção específica nos compostos orgânicos e inorgânicos (Delazare et al., 2014; Goldberg, 1997; Keren e Bingham, 1985).

Estes resultados corroboram com os de Alleoni e Camargo, (2000) onde a prática da calagem promoveu um aumento de 33% na adsorção de B em solos do estado de São Paulo. Estes resultados de aumento dos processos de adsorção e diminuição de perdas por lixiviação tem correlação demonstrada pela reação entre onde o hidróxido de alumínio recém precipitado pela reação do calcário seria passível de adsorver o boro temporariamente (Evans e Sparks, 1983; Hatcher et al., 1967). O processo de adsorção de boro relacionado ao aumento dos valores de pH também foi estudado por Steiner & Lana, (2013) onde em seu experimento com 4 solos do oeste do estado do Paraná, observaram um aumento no teor de B adsorvido a partir de aumentos médio do pH sendo o processo afetado pelos teores de matéria orgânica, argila e de óxido de alumínio. A velocidade do mecanismo químico relacionado aos processos de adsorção é considerada rápida e o processo reversível, existindo uma tendência de elevação natural dos teores de B disponíveis após a reacidificação do solo previamente tratado com CaCO_3 . Em outro trabalho a adsorção de boro foi baixa em valores de pH inferiores a 6,5 e apresentando um aumento considerável com a elevação até valores próximos de 8 (Pavan, 1987).

Do mesmo modo, a dinâmica do boro no solo sofre influência da textura e composição mineralógica do solo. Em solos de textura mais argilosa a disponibilidade de B é reduzida pelos processos de adsorção de B em oxihidróxidos de Fe e Al, evidenciado pelo aumento da capacidade máxima de adsorção de B com elevação dos teores de argila do solo. Este fato tem sido observado em diversos trabalhos realizados no Brasil e no mundo como o de Alleoni e Camargo, (2000), que encontraram uma alta correlação ($r=0,79^{**}$) entre a adsorção de boro e o teor de argila no solo, que teriam ação direta em 62% da variação do B adsorvido no solo.

A dinâmica dos processos de adsorção também tende a variar de acordo com a composição mineralógica do solo, sendo que minerais como a illita, montmorilonita e a caulinita apresentam um aumento do poder de adsorção a partir de elevações do pH. O processo de interação entre o boro e os minerais de argila foi descrito previamente, como sendo uma complexação do tipo esfera interna que remonta a processos de adsorção específica do elemento à óxidos de Fe e Al Goldberg et al. (1993). Neste mesmo estudo, a caulinita, a goethita e a gibbsita apresentaram valores muito similares para suas constantes de superfície de complexação, o que indica um processo de adsorção comum aos três minerais. Este processo este que havia sido sugerido previamente por (Mcphail et al., 1972; Sims e Bingham, 1968), e que se correlaciona com as menores perdas de B por lixiviação e maior retenção de B em solos argilosos quando comparados a solos de textura arenosa que são altamente propensos a perdas do elemento por lixiviação (Keren e Mezuman, 1981).

A matéria orgânica esta relacionada a qualidade química, física e biológica do solo, moldando características como a capacidade de retenção de água, estruturação do solo e relações dos macros e micro poros sendo fonte de nutrientes para os microrganismos e para as plantas, trazendo aumento da capacidade de troca catiônica e consequente maior oferta de nutrientes essenciais, além da influência em processos relativos ao tamponamento do pH do solo e de complexação de elementos tóxicos. No que tange a dinâmica do boro no solo, diversos trabalhos buscaram elucidar os mecanismos de interação entre a matéria orgânica e a disponibilidade do elemento.

Ácidos húmicos e fúlvicos são as frações reativas da matéria orgânica que podem interagir com íons na solução, modulando sua biodisponibilidade e mobilidade e uma grande fração do B total do solo pode ser encontrada interagindo com os compostos de carbono no solo. Reações de troca de ligantes entre o ácido bórico e grupos carboxila e hidroxila em pH menor que 7.8 com as mesmas constantes de complexação dos ácidos húmicos foram

observadas por Lemarchand et al. (2005) onde a curva de adsorção em seu experimento apresentou formato de sino, tipicamente como a curva de adsorção de um ânion, apresentando um valor de K_d , valor relacionado a massa de boro adsorvida em solução, massa de ácido húmico e massa da solução de equilíbrio, que corroborou com os achados de Gu e Lowe, (1990) e que apresentaram valores superiores aos experimentos avaliando efeitos da mineralogia do solo, interação com óxi-hidróxidos de Fe e Al, evidenciando a grande afinidade do boro pela matéria orgânica (Marzadori et al., 1991; Sharma et al., 2006).

O tipo de interação entre o ácido bórico e os compostos orgânicos pode ser exemplificado pela transição da forma trigonal planar do ácido bórico para borato que interage por exemplo com os grupos hidroxilas de grupos funcionais 1,2 diol da matéria orgânica como descrito por Karaseva et al. (2019) em seu experimento com ácido gálico (AG) e o seu derivado o ácido elágico (AE). Apesar de muitos estudos abordarem esta interação e os resultados de ajuste de curvas de adsorção em laboratório levarem a um possível consenso sobre as interações do boro com os grupamentos funcionais da matéria orgânica, os mecanismos ainda são pouco esclarecidos, podendo corresponder a reações de troca de ligantes, e alguns trabalhos demonstram que as interações são pronunciadas apenas com valores de matéria orgânica superiores a 15 g/dm³ Mezuman e Keren, (1981).

Em meio ao não conhecimento destas interações, Schmidt et al. (2021) estudaram os mecanismos destas interações entre o ácido bórico com polifenóis do ácido tânico em diferentes concentrações de ácido que variaram de 5 a 20 g/L e com uma concentração fixa de B de 20mM com soluções de pH variando entre 5 e 9 e chegaram a conclusão de que as interações do ácido bórico/borato com os compostos orgânicos estudados implicam na formação de complexos em todas as faixas de pH estudadas e que estas reações são mais pronunciadas com a elevação do pH que aumenta a formação de complexos boratodiol.

No Brasil, Soares et al. (2008) estudaram os efeitos dos atributos do solo na adsorção de boro em um Latossolo Vermelho Acriférico (LVwf) argiloso, um Latossolo Amarelo Ácrico (LAW) textura média e de um Nitossolo Vermelho eutroférico (NVef) do estado de São Paulo, e obtiveram um alto coeficiente de correlação positivo entre os teores de matéria orgânica do solo e a adsorção máxima de B $R^2 = 0,99^{**}$, mostrando a imensa afinidade entre o boro e os sítios de adsorção dos coloides orgânicos. Resultados semelhantes foram descritos por Azevedo et al. (2001), que estudando solos de várzea observaram uma forte correlação da adsorção do B e os teores de matéria orgânica.

As espécies de Boro na solução sofrem influência dos valores de pH e em condições de pH elevado, e existem relatos na literatura de interações da forma borato com os minerais de argila formando complexos de esfera interna e externa além de complexos com a matéria orgânica, o alto coeficiente de correlação entre o teores de matéria orgânica e a máximas adsorção de amostras de solo superficiais leva a formação de complexos boratidol, diversos autores relatam que os sítios mais ativos de adsorção de B pertencem aos colóides orgânicos e o efeito da matéria orgânica é mais pronunciado em solos onde os teores são superiores a 15g/dm³ (Chaudhary, 2004; Mezuman; Keren, 1981; Yermiyahu; Keren; Chen, 1995).

A concentração de boro no solo também tem correlação com a precipitação média da região, que exerce influência direta nos processos de lixiviação. Silva et al. (1995) constataram uma elevação proporcional a dose aplicada dos teores do B nas camadas subsuperficiais do perfil de solo em seu experimento com sucessivas aplicações de B na cultura do algodoeiro, a partir de doses anuais de até 3,2 kg/ha de B por 8 anos em um Latossolo roxo distrófico com 47% de argila na camada de 0-20cm. Além de aumento na produtividade de 4,7 a 15,9% em relação ao controle na cultura do algodoeiro com doses ótimas entre 0,4 e 0,8 kg/ha ano⁻¹ de boro.

O manejo da fertilidade começa com o entendimento do status químico atual do solo a ser agricultado, deste modo as técnicas para determinação da disponibilidade de um elemento para as plantas são importantes para diagnosticar possíveis cenários de falta ou excesso de um elemento. Para se realizar a extração do boro disponível, procedimentos laboratoriais que envolvem refluxo com água quente, extrações em micro-ondas, sistemas de pressurização com água quente e solução extratoras compostas por cloretos e ácidos podem ser adotados. De maneira geral, cada método de extração tem como objetivo a estimativa de B disponível para as plantas, tornando necessária a adoção de protocolos oficiais certificados.

Diversos trabalhos buscaram selecionar a melhor solução extratora para o B-disponível no solo, Aitken et al. (1987) testaram a utilização de uma solução de extração com manitol 0.05M, no entanto em condições de solos ácidos o extrator não foi eficiente, pois em condições de baixo pH apenas uma pequena porção do boro na forma de borato e assim não pode interagir com o manitol mesmo que este último esteja em excesso na solução. Além deste achados com o manitol soluções extratoras com glicerol, ácido acético, ácido tartárico e NH₄HCO₃- DTPA não foram eficientes superestimando ou subestimando os resultados das análises. Estes achados

são similares aos de Matsi et al. (2000) que demonstram que a metodologia da água quente é o extrator mais eficiente para as nossas condições de solo.

O extrator água quente é capaz de avaliar a disponibilidade de B em uma grande faixa de disponibilidade, desde valores mínimos até próximos a 3 mg kg^{-1} . Ao longo dos anos, algumas adaptações visaram a otimização do método de extração, como a utilização de uma solução diluída de cloreto de cálcio foi proposta visando evitar a dispersão das argilas. Bingham, (1982) também propôs a utilização de cloreto para flocular os colóides gerados durante o aquecimento da amostra. Raij, (2001) mencionam a possibilidade de influência da utilização do cloreto de cálcio na determinação do B-disponível por espectrometria de emissão óptica com plasma induzido, o que sugere a substituição do cloreto de cálcio por cloreto de bário.

Quanto a vidraria, esta deve ser isenta de qualquer contaminação com boro, e em razão disto alguns autores sugerem a substituição do recipiente de vidro borosilicatado por sacos ou frascos plásticos de modo a evitar possíveis contaminações. Amaral et al. (2010) buscando avaliar a eficiência de diferentes extratores para a fração lábil do B, utilizaram soluções de DTPA-TEA+Sorbitol; Fosfato de Cálcio - $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)$, Mehlich-3 e Água Quente (BaCl_2) para extração de boro em dois Latossolos com 35% e 80% de argila no estado do Paraná e observaram que todos os métodos apresentaram uma baixa taxa de recuperação do B aplicado, além de uma superestimação para o método DTPA. No entanto o método água quente apresentou a maior taxa de recuperação para os dois solos estudados sendo o mais indicado para se realizar extração de B do solo (Mahler et al., 1984; Lopes e Guilherme, 1994).

A rotina de análise de solos em um laboratório deve ser organizada e eficiente, afim de possibilitar uma rápida e acurada entrega dos resultados. A extração por água quente acaba sendo onerosa por envolver um alto custo em vidrarias livres de boro, uma grande quantidade de instrumentaria utilizada, além de requerer um ajuste preciso da temperatura da água de extração e ser adotada apenas para um nutriente. A extração de B por água quente se inicia com uma amostra de 20g de terra fina seca ao ar (TFSA) que é colocada em um béquer contendo 0,5g de carvão ativado, o carvão é utilizado para remover a interferência da matéria orgânica no processo de determinação. Após estas etapas, no béquer contendo a solução de água, solo e carvão ativado é adicionado o volume de 40 mL de água, em seguida a solução é levada a uma chapa de aquecimento condutivo por 5 minutos e por fim recebem 1,0 mL da solução de $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

A metodologia mais adotada para determinação do B disponível é o método colorimétrico que utiliza azometina-H, um reagente cromogênico produto da condensação do ácido H (ácido 8-amino-2-naftol-3,6-dissulfônico) e do aldeído salicílico, sendo o mais empregado nas análises rotineiras de águas naturais, solos e plantas. As limitações da metodologia são as possíveis interferências provocadas em solos com baixos teores de B e com elevadas concentrações de Fe, como observado por Zarcinas, (1995) e altos teores de matéria orgânica, sendo esta última interferência eliminada pelo acréscimo de carvão ativado. Na reação de determinação, o ácido bórico na solução age como catalizador da reação de transformação dos reagentes, ácido H e aldeído salicílico em Azometina-H que confere uma coloração amarelada a solução final, a medida que a concentração de boro aumenta a intensidade do amarelo também aumenta, segundo Sah e Brown, (1997) a absorbância no comprimento de onda de 420 nm é linear na faixa de concentração de 0,5 a 10 mg L⁻¹ de boro na solução (Capelle, 1961; Wolf, 1971; Abreu et al., 1994; Matsuo et al., 2004).

2.4. FONTES DE BORO

A velocidade de disponibilização dos nutrientes pelas diferentes fontes de B estão relacionadas a composição química das fontes, pela ação ácida nos processos de produção e também de fatores relacionados ao solo. Em geral, as fontes que contenham B ligado a sódio na forma de borato de sódio apresentam maior velocidade de disponibilização do nutriente enquanto as fontes que apresentam o nutriente ligado a cálcio ou magnésio ou boratos de cálcio/magnésio podem apresentar uma liberação mais gradual de boro.

As fontes de boro mais utilizadas são compostas tanto por boratos de sódio como o Tetraborato de sódio, Pentaborato de sódio e Octaborato de Sódio ou com uma composição mista no caso da Ulexita, que é composta por boratos de sódio e cálcio além de fontes de que contém compostos orgânicos como o borato de monoetanolamina e também na forma de ácido bórico. A forma química da fonte ácido bórico favorece os processos de perdas por lixiviação pois é uma fonte que se encontra na forma molecular prontamente disponível, com carga zero com baixa afinidade com os componentes estruturais do solo sendo altamente suscetível as perdas por lixiviação (Mortvedt, 1994; Byers et al., 2001).

Sahin, (2005) em seu estudo com diferentes fontes de boro observou que os tratamentos que receberam a dose de boro via colemanita granulada apresentaram concentração do elemento 20% menor nos tecidos de plantas de milho. Este fato pode ser explicado pela baixa velocidade de disponibilização do nutrientes pela fonte, já para as demais fontes, Bórax decahidratado e pentahidratado, tetraborato de sódio e ácido bórico não foram observadas diferenças na concentração do elemento nos tecidos das plantas. Além disso, a nutrição com B aumentou a absorção de N pelas plantas em cerca de 10%. Esta interação positiva entre boro e nitrogênio já havia sido descrita previamente por Inal e Tarakicoglu, (2001) em seu estudo com a cultura da cebola.

A partir do entendimento da dinâmica do nutriente no solo é possível presumir que a aplicação anual do elemento é fundamental, pois o efeito residual das diferentes fontes tende a ser baixo e as doses habitualmente aplicadas geralmente suprem os requerimentos nutricionais de um ou mais ciclos. Saleem et al. (2011) avaliaram o efeito residual da aplicação de bórax e colemanita na forma de pó e granulada na cultura do arroz com doses variando de 1 a 3 kg de B aplicados no primeiro cultivo, onde a aplicação de boro impactou positivamente o crescimento e a produtividade da cultura, especialmente no primeiro ano e na cultura

subsequente com a dose de 3 kg de B. Além disso, a forma de aplicação do fertilizante (granulado ou em pó, no caso da colemanita), influenciou o rendimento em ambos os anos de cultivo.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito da nutrição com boro na produtividade e nos componentes de produção da cultura da soja e milho.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar a melhor dose de boro para a nutrição da cultura da soja e milho em diferentes condições de solo
2. Avaliar o desempenho das diferentes fontes em solos de textura contrastantes.
3. Avaliar o efeito da nutrição com boro nos parâmetros de desenvolvimento e no estado nutricional das plantas de soja.
4. Avaliar a melhor estratégia de replicação de boro no sistema a partir de estratégias bi/trienais.

3.3. HIPÓTESES

A nutrição com boro é capaz de aumentar a produtividade da cultura da soja nas diferentes condições de solo, intervalos de reaplicação e fonte utilizada. A aplicação anual de boro é superior as estratégias de reaplicação, principalmente em solos de textura média e arenosa. A nutrição com boro é capaz de influenciar em parâmetros produtivos e no estado nutricional da cultura da soja. A nutrição com boro residual da cultura da soja é capaz de nutrir a cultura do milho em sequência.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITKEN, R. L.; JEFFERY, A. J.; COMPTON, B. L. Evaluation of Selected Extractants for Boron in Some Queensland Soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 25, n. 2, p. 263-273, 1987.

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. BORON ADSORPTION IN SOILS FROM THE STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL. **Pesq. agropec. bras.**, v. 35, n. 2, p. 413–421, 2000.

AMARAL, J.; OLIVEIRA JUNIOR, F. A. DE; CASTRO, C. DE. **Métodos químicos para extração de boro no solo. EMBRAPA SOJA**, 2010.

ARCHANA; PANDEY, N. Reproductive development and pollen-stigma interaction in sunflower plants receiving boron deficient and toxic supply. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 14, p. 2157–2166, 2021.

ARNON, D. I.; STOUT, P. R. THE ESSENTIALITY OF CERTAIN ELEMENTS IN MINUTE QUANTITY FOR PLANTS WITH SPECIAL REFERENCE TO COPPER. **Plant physiology**, 1939.

ARREDONDO, G.; BONOMELLI, C. Effect of Three Boron Concentrations in Soil on Growth and Physiology in Sweet Cherry Trees. **Plants**, v. 12, n. 6, 1 mar. 2023.

AZEVEDO, W. R.; FAQUI, V.; FERNANDES, L. A. Adsorção de boro em solos de várzea do Sul de Minas Gerais. **Pesq. agropec. bras.**, v. 36, n. 7, 2001.

BELLALOUI, N.; HUANG, C.; GRUSAK, M. A.; ZOBIOLE, L. H. S. Role of boron nutrient in nodules growth and nitrogen fixation in soybean genotypes under water stress conditions. In: DUBEY, S. K. (Ed.). **Advances in Biology and Ecology of Nitrogen Fixation**. Rijeka: InTech, 2014.

BERGMANN, W. Nutritional Disorders of Plants: Development, **Visual and Analytical Diagnosis**. Jena: Gustav Fischer Verlag, 1992.

BHADRA, T.; MAHAPATRA, C.K.; HOSENUZZAMAN, M.; GUPTA, D.R.; HASHEM, A.; AVILA-QUEZADA, G.D.; ABD_ ALLAH, E.F.; HOQUE, M.A.; PAUL, S.K. Zinc and Boron Soil Applications Affect *Athelia rolfsii* Stress Response in Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) Plants. **Plants**, v. 12, n. 19, 1 out. 2023.

BINGHAM, F. T. Methods of soil analysis. Em: MILLER, A. J.; KEENEY, R. H. (Eds.). Madison: American Society of Agronomy, **Soil Science Society of America**, , 1982. p. 431–447.

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

BROWN, P. H.; HU H. Phloem mobility of boron is species dependent. Evidence for phloem mobility in sorbitol rich species. **Ann. Bot.** v.77, p. 497–505, 1996.

BRDAR-JOKANOVIĆ, M. Boron toxicity and deficiency in agricultural plants. International Journal of Molecular Sciences, **MDPI AG**, , 2 fev. 2020.

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

CAPELLE, R. Microdosage colorimétrique du bore en milieu aqueux, au moyen de réactifs a groupement azolque ou imine dérivés des acides h et k. **Analytica Chimica Acta**, v. 24, p. 555–572, 1961.

CEPEA. **PIB DO AGRONEGÓCIO BRASILEIRO**. Disponível em: <

CONAB. Primeira estimativa para safra de grãos 2024/25 indica produção de 322,47 milhões de toneladas. **Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB)**, 08 fev. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5770-primeira-estimativa-para-safra-de-graos-2024-25-indica-producao-de-322-47-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 26 fev. 2025.

CHAUDHARY, D. Boron adsorption and desorption in arid soils of India. **AGROCHIMICA**, v. 48, 2004.

GOMES, I. D. S.; BENETT, C.G.S.; JUNIOR, R.L.; XAVIER, R.C.; NEBETT, K.S.S.; SILVA, A.R.; CONEGLIAN, A.. Boron fertilisation at different phenological stages of soybean. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 8, p. 1026–1032, 2017.

DAMETO, L. S.; MORAES, L. A. C.; MOREIRA, A. Effects of boron sources and rates on grain yield, yield components, nutritional status, and changes in the soil chemical attributes of soybean. **Journal of Plant Nutrition**, v. 46, n. 9, p. 2077–2088, 2023.

DE ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; BERTON, R. S. Extraction of boron from soil by microwave heating for ICP-AES determination. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 25, n. 19-20, p. 3321–3333, 1 dez. 1994.

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

DELAZARE, T.; PERAZZO, T. F.; NASCIMENTO, G. E.; GOMES, G. P.; NASCIMENTO, R. F.; FRANKENBERG, J.; MATTOS, E. C. Removal of boron from oilfield wastewater via adsorption with synthetic layered double hydroxides. **Journal of Environmental Science and Health**, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, v. 49, n. 8, p. 923–932, 2014.

DONAIRE RABAIOLI, F.; RICHART, A.; MENEGHEL, B. P. C.; ROHDE, E. H. Fontes e doses de boro aplicadas em pré-semeadura da soja sobre os componentes de rendimento. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v. 10, n. 1, p. 109-123, 2021.

ENGLER, M. P. C.; BUZETTI, S.; SILVA, F. C.; ARF, O., SÁ M. E. de. Ways of applying boron and zinc to two upland rice cultivars **Científica, Jaboticabal**, v.34, n.2, p. 129-135, 2006

EVANS, C. M.; SPARKS, D. L. On the chemistry and mineralogy of boron in pure and in mixed systems: A review. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 1 ago. 1983.

AMARAL, J.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. de; OLIVEIRA, F. A., de; CASTRO, C.. Métodos químicos para extração de boro no solo. **EMBRAPA Soja**, 323, 2006.

FREITAS, I. L.; TEIXEIRA, G. C.; CAMPOS, C. N. S.. TEODORO, L. P. R.; RODRIGUES, D. M.; ALVARES, R. C. F.; PRADO, R. M.; TEODORO, P. E. Impact of boron fertilisation on

soybean grain yield as affected by associated physiological factors. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, 2024.

GALERIANI, T. M.; NEVES, G. O.; FERREIRA, J. H. S.; OLIVEIRA, R. N.; OLIVEIRA, S. L.; CALONEGO, J. C.; CRUSCIOL, C. A. C. Calcium and boron fertilization improves soybean photosynthetic efficiency and grain yield. **Plants**, v. 11, n. 21, 1 nov. 2022.

GALRÃO, E. Z.; SOUSA, D. M. G. de. Efeito do boro na esterilidade masculina do trigo em um solo orgânico de várzea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 47-152, 1988.

GARCÍA-SÁNCHEZ, F. ; SIMÓN-GRAO, S. ; NICOLÁS, M.; SIMÓN, A. F.; LIU, C.; CHATZISSAVVIDIS, C.; PÉRES, P. G.J. ; ZAPATA, C. J. M.. Multiple stresses occurring with boron toxicity and deficiency in plants. **Journal of Hazardous Materials**, v. 397, 5 out. 2020.

GE, J.; ZHOU, Q.; LI, X.; ZHANG, J.; LI, Y.; WANG, H.; ZHANG, C. Boron alleviates the aluminum toxicity in buckwheat by regulating antioxidant defense system and maintaining osmotic balance. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 241, p. 113773, 2023.

GOEDERT, W. J. REGIÃO DOS CERRADOS:POTENCIAL AGRÍCOLA E POLÍTICA PARA SEU DESENVOLVIMENTO. **Pesq. agropec. bras.**, v. 24, 1989.

GOEDERT, W.J.; SOUZA, D. G. M.; REIN, T.A. Princípios metodológicos para avaliação agronômica de fontes de fósforo. Planaltina. **EMBRAPA/CPAC**, 23p., 1986.

GOLDBERG, S. **Reactions of boron with soils. Plant and Soil**. [s.l.] Kluwer Academic Publishers, 1997.

GOLDBERG, S.; CORWIN, D. L.; SUARES, S. P. J.. Prediction of Boron Adsorption by Field Samples of Diverse Textures. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 5, p. 1379–1388, set. 2005.

GOLDBERG, S.; FORSTER, H. S.; HEICK, E. L. Boron Adsorption Mechanisms on Oxides, Clay Minerals, and Soils Inferred from Ionic Strength Effects. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, n. 3, p. 704-708, 1993.

GU, B.; LOWE, L. E. STUDIES ON THE ADSORPTION OF BORON ON HUMIC ACIDS. **Can. J. Soil. Sci.**, v. 70, p. 305–311, 1990.

GUPTA, U. C, JAME, W.J. ; CAMPBELL, C.A. ; LEYSHON, A.J. ; NICHOLAICHUK, W.. et al. BORON TOXICITY AND DEFICIENCY: A REVIEW. **Soil Sci.**, v. 65, n. 3, p. 381–409, 1985.

HATCHER, J. T.; BOWER, C. A.; CLARK, M. ADSORPTION OF BORON BY SOILS AS INFLUNCE BY HYDROXY ALUMINUM AND SURFACE AREA. **SOIL SCIENCE**, v. 104, n. 6, 1967.

HAYES, J.E.; REID, R.J. Boron tolerance in barley is mediated by efflux of B from the roots. **Plant Physiol.** v.136, n.2, 3376-82, 2004.

HU H.; PENN, S. G.; LEBRILLA, C. B.; BROWN, P. H. Isolation and characterization of soluble B-complexes in higher plants. **Plant Physiol**, v.113, p. 649–655, 1997.

IBGE. IBGE prevê safra de 322,6 milhões de toneladas para 2025, com crescimento de 10,2% frente a 2024. **Agência de Notícias IBGE**, 08 fev. 2024. Acesso em: 26 fev. 2025.

INAL, A.; TARAKCIOGLU, C. Effects of nitrogen forms on growth, nitrate accumulation, membrane permeability, and nitrogen use efficiency of hydroponically grown bunch onion under boron deficiency and toxicity. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, n. 10, p. 1521–1534, 2001.

KARASEVA, V.; BERGERET, A.; LACOSTE, C.; FERRY, L. New biosourced flame retardant agents based on gallic and ellagic acids for epoxy resins. **Molecules**, v. 24, n. 23, p. 4305, 26 nov. 2019.

KEREN, R.; BINGHAM, F. T. Boron in Water, Soils, and Plants. Em: **Advances in Soil Science**. New York, NY: Springer Verlag Inc., 1985. v. 1p. 229–276.

KEREN, R.; MEZUMAN, U. BORON ADSORPTION BY CLAY MINERALS USING A PHENOMENOLOGICAL EQUATION I. **Clays and Clay Minerals**, v. 29, n. 3, p. 198–204, 1981.

KREUZ, C.; LANZER, E.; PARIS, Q. Funções de Produção Liebig. **Pesqui. Agropecu. brasileira**, v. 30, n. 1, p. 95–106, jan. 1995.

LEMARCHAND, E.; SCHOTT, J.; GAILLARDET, J. Boron isotopic fractionation related to boron sorption on humic acid and the structure of surface complexes formed. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 69, n. 14, p. 3519–3533, 15 jul. 2005.

LONG, Y.; PENG, J. **Interaction between Boron and Other Elements in Plants**. GenesNLM (Medline), , 3 jan. 2023a.

LOPES, A S.. **Manual Internacional de Fertilidade do Solo**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1998.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Solos sob cerrado: manejo da fertilidade para produção agropecuária. ANDA. São Paulo, SP, Boletim Técnico V. 5, 2ª edição, 62p, 1994.

MAHLER, R. L.; NAYLOR, D. V.; FREDRICKSON, M. K. Hot water extraction of boron from soils using sealed plastic pouches. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 15, n. 5, p. 479–492, 1 maio 1984.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: **Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo**, 1977.

MARTÍNEZ-CUENCA M.R.; MARTÍNEZ-ALCÁNTARA B.; QUIÑONES A.; RUIZ M.; IGLESIAS D.J.; PRIMO-MILLO E.; FORNER-GINER MÁ.. Physiological and molecular responses to excess boron in Citrus macrophyllaw. **PLoS ONE**, v. 10, n. 7, 30 jul. 2015.

MARZADORI, C. et al. Soil Organic Matter Influence on Adsorption and Desorption of Boron. **Soil Sci. Soc. Am.J.**, v. 55, p. 1582–1585, 1991.

MATSI, T.; ANTONIADIS, V.; BARBAYIANNIS, N. Evaluation of the NH_4HCO_3 -DTPA soil test for assessing boron availability to wheat. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 31, n. 5–6, p. 669–678, 2000.

MATSUO, H.; MIYAZAKI, Y.; TAKEMURA, H.; MATSUOLA, S.; SAKASHITA, H.; YOSHIMURA, K. ¹¹B NMR study on the interaction of boric acid with Azomethine H. **Polyhedron**, v. 23, n. 6, p. 955–961, 25 mar. 2004.

MCPHAIL, M.; PAGE, A. L.; BINGHAM, F. T. Adsorption Interactions of Monosilicic and Boric Acid on Hydrous Oxides of Iron and Aluminum. **SOIL SCI. SOC. AMER. PROC.**, v. 36, p. 510–514, 1972.

MEZUMAN, U.; KEREN, R. Boron Adsorption by Soils Using a Phenomenological Adsorption Equation. **SOIL SCI. SOC. AM. J.**, v. 45, p. 722–726, 1981.

MORTVEDT, J. J. Needs for controlled-availability micronutrient fertilizers. *Fertilizer Research*, Dordrecht, v. 38, p. 213–221, 1994.

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**, 2007.

ÖZDEMİR, Z.; ZORLU, S.; AKYILDIZ, M.; ERYILMAZ, F.Y.. Determination of Indicator Plants for Boron in the Kirka (Eskisehir/Turkey) Boron Deposit Area. **International Journal of Geosciences**, v. 05, n. 01, p. 77–84, 2013.

PAVAN, M. A. Reações de Equilíbrio Solo-Boro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 133–138, 1987.

PEÑALOZA, P.; TOLOZA, P. Boron increases pollen quality, pollination, and fertility of different genetic lines of pepper. **Journal of Plant Nutrition**, v. 41, n. 8, p. 969–979, 9 maio 2018.

PEREIRA, A. F.; SILVA, A. G.; CAMPOS, L. J. M.; SILVA NETO, S. P. Respostas de soja a diferentes arranjos de plantas nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 2021.

POMMERENIG, B.; EGGERT, K.; BIENERT, G. P. Boron deficiency effects on sugar, ionome, and phytohormone profiles of vascular and non-vascular leaf tissues of common plantain (*Plantago major* L.). **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 16, 2 ago. 2019.

RABAIOLI, F. D.; ROSOLEM, C. A.; TRIVELIN, P. C. O. Fontes e doses de boro aplicadas em pré-semeadura da soja sobre os componentes de rendimento. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 3, n. 1, p. 1-10, 2014.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, SP: **Instituto Agrônômico**, 2001.

REDONDO-NIETO, M.; RIVILLA, R.; EL-HAMDAOUI, A.; BONILLA, I.; BOLAÑOS, L. Boron deficiency affects early infection events in the pea-Rhizobium symbiotic interaction. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 28, p. 819–823, 2001.

REID, R. J.; FITZPATRICK, K. L. Influence of leaf tolerance mechanisms and high on boron toxicity in Barley and Wheat. **Plant Physiol**, v. 151, n. 1, p. 413–20, 2009.

REID, R. J.; FITZPATRICK, K. L. Redistribution of boron in leaves reduces boron toxicity. **Plant signaling & behavior**, v. 4, n. 11, p. 1091–1093, 2009.

RIAZ, M.; YAN, L.; WU, X.; HUSSAIN, S.; AZIZ, O.; WANG, Y.; IMRAN, M.; JIANG, C. Boron alleviates the aluminum toxicity in trifoliate orange by regulating antioxidant defense system and reducing root cell injury. **Journal of Environmental Management**, v. 208, p. 149–158, 15 fev. 2018.

RODRIGUES, D. M. et al. Boron nutrition increase soybean seed yield and maintain the quality of germination in storage seeds. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 46, n. 7, 1 jul. 2024.

ROSOLEM, C. A.; LEITE, V. M. Coffee Leaf and Stem Anatomy Under Boron Deficiency. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 3, p. 477-481, 2007.

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

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF, 353 p.: **Embrapa**, 2013.

SAH, R. N., BROWN, P. H. Techniques for boron determination and their application to the analysis of plant and soil. **Plant and Soil**, Holanda, v.193, p. 15-33, 1997

ŞAHİN, S.; ŞAHİN, S. Effect of Boron Fertilizer Applications on the Growth and B, N Uptake of Maize (*Zea mays* L.) Under Different Soils. **Agriculture & Environment**, v. 2, n. 1, p. 13-20, 2004.

SALEEM, M.; YUSOP, M. K.; ISHAK, F.; SAMSURI, A.; W.; HAFEEZ, B. Boron fertilizers borax and colemanite application on rice and their residual effect on the following crop cycle. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 57, n. 3, p. 403–410, 2011.

SCHMIDT, M. P.; SICILIANO, S. D.; PEAK, D. The role of monodentate tetrahedral borate complexes in boric acid binding to a soil organic matter analogue. **Chemosphere**, v. 276, 1 ago. 2021.

SHAH, A.; WU, X.; ULAH, A.; FAHAD, S.; MUHAMMAD, R.; YAN, L.; JIANG, C. Deficiency and toxicity of boron: Alterations in growth, oxidative damage and uptake by citrange orange plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 145, p. 575–582, 1 nov. 2017.

SHARAFI, Y.; RAINA, M. Effect of Boron on Pollen Attributes in Different Cultivars of *Malus domestica* L. **National Academy Science Letters**, v. 44, n. 3, p. 189–194, 1 jun. 2021.

SHARMA, K. R.; SRIVASTAVA, P.C.; SRIVASTAVA, P.; SINGH, V.P. Effect of farmyard manure application on boron adsorption-desorption characteristics of some soils. **Chemosphere**, v. 65, n. 5, p. 769–777, out. 2006.

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**, MDPI AG, , 1 jul. 2018.

SILVA, N.; CARVALHO, L.H.; KONDO, J.I.; BATAGLIA, O.C.; ABREU, C.A. Dez anos de sucessivas adubações com boro no algodoeiro. **Bragantia**, 1995.

SIMÓN, I.; LÓPEZ, L.D.; GIMENO, V.; NIEVES, M.; PEREIRA, W.E.; MARTÍNEZ, V.; LIDON, V.; GRACÍA-SANCHÉS, F. Effects of boron excess in nutrient solution on growth, mineral nutrition, and physiological parameters of *Jatropha curcas* seedlings. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 176, n. 2, p. 165–174, abr. 2013.

SIMS, J. R.; BINGHAM, F. T. Retention of Boron by Layer Silicates, Sesquioxides, and Soil Materials: III. Iron-and Aluminum-Coated Layer Silicates and Soil Materials. **SOIL SCI. SOC. AMER. PROC.**, v. 32, 1968.

CAMPOS, T. S.; SOUZA, A.G.V; FARIA, O.L.; CINTRA, P.H.N.; MELO, O.F.P.; RODRIGUES, D.B.; BENETT, C.G.S.; BENETT, K.S.S.; TUNES, L.V.M.; MIGUEL, P. et al. Productivity, quality and composition of soybean seeds in storage as a function of boron doses at different phenological stages **Revista de Ciências Agrárias**, v. n. 1, p. 68–81, 2021.

SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C.; ALLEONI, L. R. F. Adsorção de Boro em Solos Ácricos em Função da Variação do pH. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1113-1122, 2008.

STEINER, F.; LANA, M. DO C. Effect of pH on boron adsorption in some soils of Paraná, Brazil. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 73, n. 2, p. 181–186, jun. 2013.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E.. Cerrado: correção do solo e adubação. **Embrapa Cerrados**. 2 Ed., Brasília – DF. 416p, 2004.

TAIZ, L. , Z. E. , M. I. M. , & M. A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre –RS: Editora Artemed, 2017.

TAKANO, J.; WADA, N.; LUDEWIG, U.; SCHAAF, G.; VON WIREN, N.; FUJIWARA, T. The Arabidopsis major intrinsic protein NIP5;1 is essential for efficient boron uptake and plant development on the boron limitation. **Plant Cell**. v. 18(6), 1498-509, 2006.

VERA-MALDONADO, P.; AQUEA, F.; REYES-DÍAZ, M.; CÁRCAMO-FINCHEIRA, P.; STO-CERDE, B.; NUNES-NESI, A.; INOSTROZA-BLANCHETEAU, C. Role of boron and

its interaction with other elements in plants. **Frontiers in Plant Science** **Frontiers Media SA**, 2024.

WARINGTON, K. The Effect of Boric Acid and Borax on the Broad Bean and certain other Plants. **Annals of botany**, 1923.

WILDER, S. L.; SCOTT, S.; WALLER, S.; POWELL, A.; BENOIT, M.; GUTHRIE, J. M.; SCHUELLER, M. J.; AWALE, P.; MCSTEEN, P.; MATTHES, M. S. Carbon-11 radiotracing reveals physiological and metabolic responses of maize grown under different regimes of boron treatment. **Plants**, v. 11, p. 241, 2022.

WOLF, B. The determination of boron in soil extracts, plant materials, composts, manures, water and nutrient solutions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 2, n. 5, p. 363–374, 1971.

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

YAMAGISHI, M.; YAMAMOTO, Y. Effects of boron on nodule development and symbiotic nitrogen fixation in soybean plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 40, n. 2, p. 265–274, 1994.

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.

ZARCINAS, B. A. Suppression of iron interference in the determination of boron using the azomethine-H procedure. **Communications in soils Science and Planta Analysis**, New York, v. 16, p. 713-729, 1995.

CAPÍTULO ÚNICO

1. INTRODUÇÃO

O cultivo de soja (*Glicine max* L.) e milho (*Zea mays* L.) são as principais atividades agrícolas desempenhadas no Cerrado brasileiro. Com uma área de produção no país de cerca de 47 milhões hectares na safra 2024/25, a soja é a principal oleaginosa produzida no mundo, sendo direcionada principalmente para a indústria de rações e alimentos e mais recentemente para os setores de biocombustíveis e alimentação humana (Nogueira-de-Almeida et al., 2020). Para a safra 2024/25 a produção estimada é de 166,01 milhões de toneladas do grão, um aumento de 12,4% e relação a última safra. As projeções apontam para o Brasil sendo o maior produtor de soja do mundo na safra 2024/25 (USDA, 2024). O milho é hoje a principal cultura da safra de inverno no país com expectativa de incremento de 2,4% na área de plantio no ano de 2024 e com produção de 96 milhões de toneladas, abastecendo os setores de alimentação animal, alimentação humana e produção de etanol sendo o Brasil o terceiro maior produtor de milho do mundo (BRASIL, 2024). Os avanços genéticos e o desenvolvimento tecnológico foram pilares fundamentais para a expansão dos cultivos de cereais no país.

O boro (B) é um micronutriente essencial ao desenvolvimento vegetal desempenhando funções específicas no metabolismo das plantas. Dentre as funções desempenhadas pelo nutriente destacam-se todos os processos relacionados a formação de novos tecidos pois o elemento atua na formação da parede celular. Além disso, a participação nos processos relacionados a polinização (Archana e Pandey, 2021) no que tange a germinação e o crescimento do tubo polínico são funções do elemento. Outros processos relativos à absorção de outros elementos da solução do solo, do transporte de açúcares, da ativação enzimáticas, nos processos relacionados a síntese proteica (Mengel e Kirkby, 1987) e na atuação de estresses bióticos e abióticos são empregadas ao nutriente (Ge et al., 2023; Riaz et al., 2018). O processo de absorção do elemento por fluxo em massa e sua dinâmica de redistribuição única que varia entre espécies vegetais, tornam-se importantes temas de estudo para o entendimento dos pilares da nutrição com boro (Arnon e Stout, 1939; Shireen et al., 2018).

No solo e na faixa de pH agrícola, o boro está em maior proporção em sua forma não ionizada, a forma molecular de ácido bórico (Ozdemir et al., 2014). No tocante a dinâmica do elemento no solo, as características químicas de sua forma molecular, com carga neutra, têm relação direta com os processos de lixiviação do elemento e este fato justifica, em grande parte, os teores baixos nas áreas produtivas no Cerrado do país. Fatores relacionados a composição

mineralógica do solo, ao pH e aos teores de matéria orgânica modulam a concentração do elemento e sua disponibilidade para nutrição dos cultivos. Em vista disto, a nutrição suplementar com boro vem a ser uma estratégia necessária na agricultura (Goldberg, 1997).

Atualmente diversas fontes são empregadas para o fornecimento desse elemento para os cultivos de verão e inverno, sendo aplicadas tanto via solo como também como uma suplementação foliar adicional, a fim de suprimir os sintomas de deficiência observados, como deformações no tecido das plantas, e garantir um ambiente de desenvolvimento que permita a expressão do máximo potencial produtivo (Byers et al., 2001).

Diante do exposto, este trabalho visou caracterizar, em 4 diferentes localidades do Cerrado com solos contrastantes através de uma rede experimental conduzida entre 2018 e 2024, as respostas das culturas da soja e do milho a doses crescentes do elemento, a performance de quatro diferentes fontes de boro em cada condição de solo, a influência da nutrição na modulação de parâmetros produtivos e do estado nutricional da cultura da soja e a avaliação conjunta das estratégias de reaplicação de boro no sistema agrícola.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. LOCALIDADES EXPERIMENTAIS

O presente estudo abrange uma rede de experimentos em diferentes localidades e safras, avaliando as respostas da cultura da soja e milho a nutrição com boro aplicado via solo (Figura 1). No estado do Goiás o conjunto de dados é oriundo de 3 estações experimentais. A primeira em Rio Verde contando com duas fases de condução do experimento em uma condição de sistema de produção de soja já estabelecido entre os anos de 2018 e 2021 e entre os anos de 2021 e 2023 com inclusão da cultura do milho nos cultivos de inverno entre 2019 e 2023 após a colheita da soja. A segunda unidade experimental estava localizada no município Ouvidor (21,5 km de distância de Catalão) e será tratada aqui como polo experimental de Catalão com condição de solo nativo, contou com 3 cultivos de soja entre os anos de 2019 e 2022. A terceira estação no município de Cristalina, em um sistema já estabelecido do cultivo de soja, contou com 2 cultivos de soja entre os anos de 2022 e 2024. Além destas, a quarta estação experimental, localizada no estado da Bahia no município de Jaborandi, teve o experimento conduzido com a cultura da soja entre os anos de 2021 e 2024, em área já estabelecida de cultivo de soja. No total dos experimentos, ao longo de 6 safras, foram realizados 13 cultivos de soja e 5 cultivos de milho (Tabela 1).

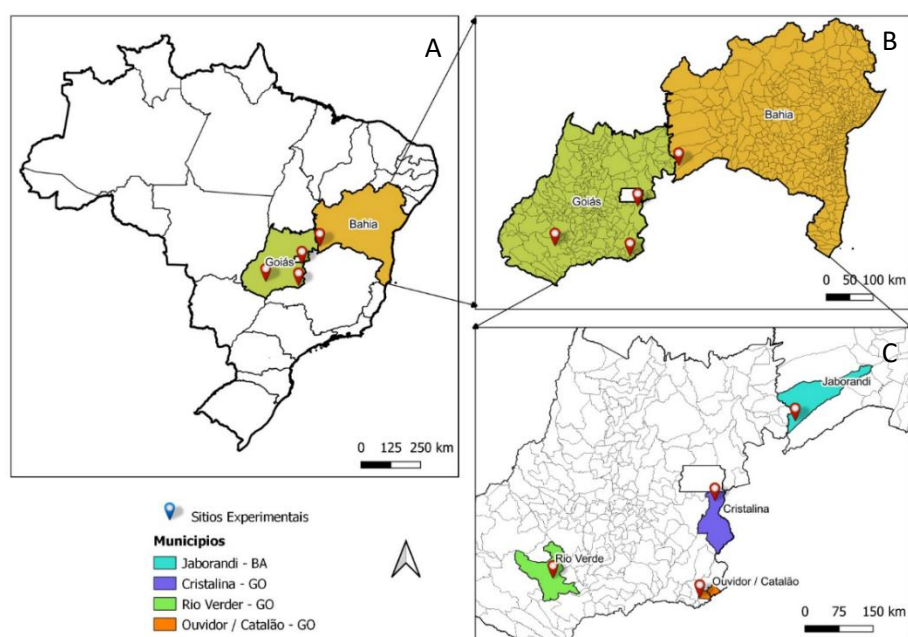


Figura 1. Localidades Experimentais dispostas nos estados de Goiás e Bahia. Mapa do Brasil (A) com o estado de Goiás e Bahia destacados (B) localização das 4 unidades experimentais no município de Rio Verde, Catalão, Cristalina e Jaborandi nos estados de GO e BA (C).

Tabela 1. Descrição de cultivos por estação experimental entre as safras de 2018/19 e 2023/24.

Estação	Safra 18-19	Safra 19-20	Safra 20-21	Safra 21-22	Safra 22-23	Safra 23-24
Rio Verde	Soja-Milho	Soja- Milho	Soja- Milho	Soja- Milho	Soja- Milho	- -
Catalão	-	Soja	Soja	Soja	-	-
Jaborandi	-	-	-	Soja	Soja	Soja
Cristalina	-	-	-	-	Soja	Soja

No primeiro ano o experimento foi conduzido na estação experimental do GAPES - Grupo Associado de Pesquisas do Sudoeste Goiano (17°52'06.43"S, 50°55'37.34"O), sediado em Rio Verde-Go. O solo referente a área é classificado como Latossolo Vermelho de textura argilosa (EMBRAPA, 2013), com 750 m de altitude. A região tem clima do tipo Aw, partir de classificação de Koppen, com o período chuvoso na região entre nos meses de outubro até

março, com estação seca nos meses de abril a setembro e com temperatura média na faixa de 19 a 24 °C (Figura 2).

As parcelas experimentais foram constituídas de 5 m de largura por 8 m de comprimento, o que totalizava 40 m². Nas safras conduzidas na unidade de Rio Verde a variedade de soja utilizada foi a Bônus pertencente ao grupo de maturação 7.4 com hábito de crescimento indeterminado. Os resultados da análise de solo inicial do experimento encontra-se na (Tabela 2).

Tabela 2. Análise química do solo antes da implantação do experimento em Rio Verde-GO.

Camada	Argila	V%	MOS	pH CaCl2	CTC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K	P _{Meh-1}	B
(cm)	g/kg	-----%----				---cmolc dm ⁻³ ----			-----mg dm ⁻³ -----	
0-20	450	54,8	3,5	5,33	9,51	3,9	1,14	89	17	0,16

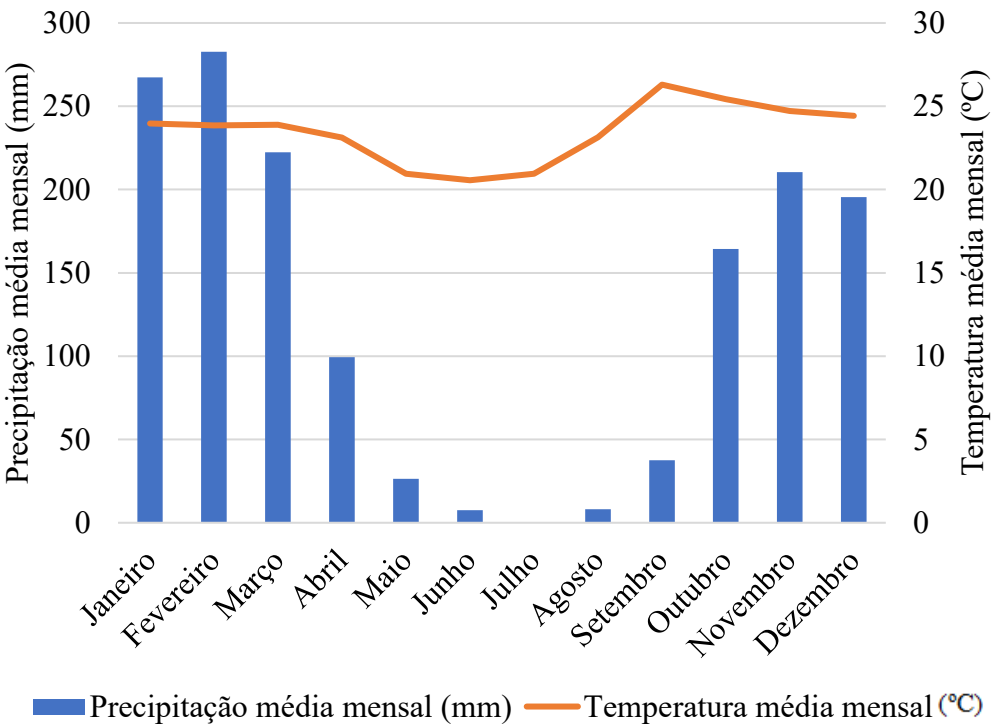


Figura 2. Temperatura e precipitação média da região de Rio Verde no estado do Goiás entre as safras de 2018/19 e 2022/23. Fonte: INMET, 2024.

Em Catalão o experimento foi conduzido na estação experimental da Cerrado consultoria, sediada na Fazenda Santa Rosa no município de Ouvidor-GO (18°16'04.5"S 47°50'59.6"W), localizado a 21,5 km de Catalão-GO. No local do experimento o solo (Tabela

3) é classificado (EMBRAPA, 2013) como Latossolo Vermelho Amarelo de textura média-argilosa, com 745 m de altitude. A região tem clima predominante do tipo Aw, partir de classificação de Koppen, (Figura 3) com o período chuvoso na região entre os meses de outubro até março, com estação seca nos meses de abril a setembro e com temperatura média na faixa de 19 a 24 °C.

O experimento foi instalado seguindo o delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições. As parcelas experimentais foram constituídas de 4 m de largura por 8 m de comprimento, o que totalizava 32 m². Nas três safras conduzidas na unidade de Catalão a variedade de soja utilizada foi a CZ 37B43 IPRO pertencente ao grupo de maturação 7,4 com hábito de crescimento indeterminado e ampla adaptação geográfica.

Tabela 3. Análise química do solo antes da implantação do experimento em Catalão-GO.

Camada (cm)	Argila	V%	MOS	pH CaCl ₂	CTC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K	P _{Meh-1}	B
	g/kg	-----%-----				---cmolc dm ⁻³ ----			-----mg dm ⁻³ -----	
0-20	331,25	53,50	2,40	5,14	4,65	1,33	0,99	68,9	1,05	0,32

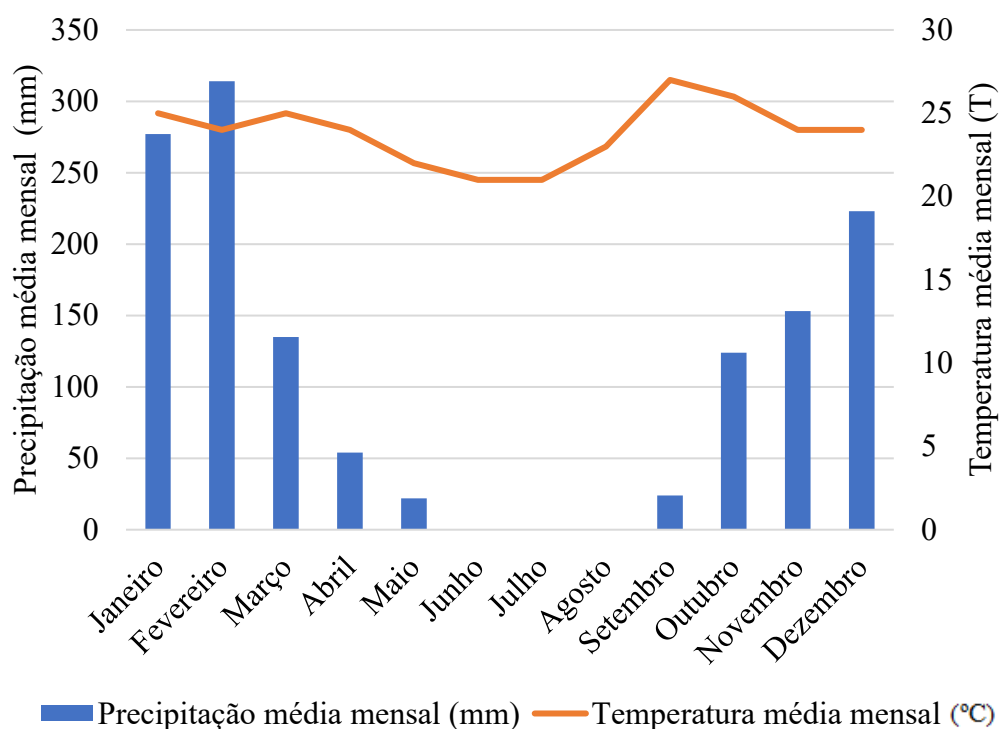


Figura 3. Temperatura e precipitação média da região de Catalão no estado do Goiás entre as safras de 2019/20 e 2021/22. Fonte: INMET, 2024.

Durantes as safras de 2022/23 e 2023/24 foi conduzido o experimento em uma área experimental da fazenda Matão localizada em Cristalina-GO no polo experimental da Associação de Pesquisa Brasil Central – APBC (-16.244570°S, -47.533624°O). No local do experimento o solo é classificado (EMBRAPA, 2013) como Latossolo Vermelho de textura argilosa (Tabela 4). A região tem clima predominante do tipo Aw, partir de classificação de Koppen, o período chuvoso (Figura 4) na região é entre meses de outubro até março, com estação seca nos meses de abril a setembro e com temperatura média na faixa de 19 a 24 °C.

As parcelas experimentais foram constituídas de 4 m de largura por 8 m de comprimento, o que totalizava 32 m². Nas duas safras conduzidas na unidade de Cristalina a variedade utilizada foi a Brasmax Olimpo IPRO pertencente ao grupo de maturação 8.0 com hábito de crescimento indeterminado e alta exigência nutricional.

Tabela 4. Análise química do solo antes da implantação do experimento em Cristalina-GO.

Camada (cm)	Argila	V%	MOS	pH CaCl ₂	CTC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K	P _{Meh-1}	B
	g/kg	-----%-----				---cmolc dm ⁻³ ----		-----mg dm ⁻³ -----		
0-20	555,0	31,68	2,95	5,29	7,67	1,66	0,55	86,02	12,1	0,58

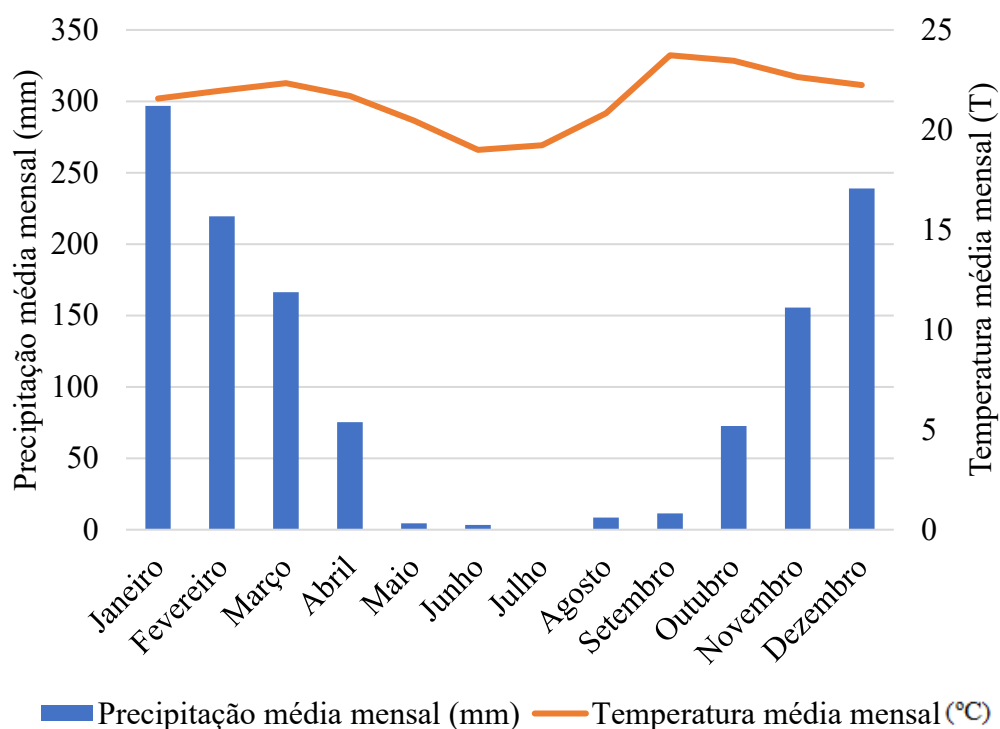


Figura 4. Temperatura e precipitação média da região de Cristalina no estado do Goiás entre as safras de 2022/23 e 2023/24. Fonte: INMET, 2024.

Durantes as safras de 2021/22 e 2023/24 foi conduzido o experimento em uma área experimental da Smart Agrotech na Fazenda São Miguel em Jaborandi-BA (-14.572331°S, -45.850703°W). No local do experimento o solo é classificado como como Latossolo vermelho-amarelo com textura médio-arenosa (EMBRAPA, 2013). A região tem clima predominante Aw, partir de classificação de Koppen, o período chuvoso (Figura 5) na região ocorre entre novembro e janeiro e temperatura média na faixa de 18 a 34 °C.

O experimento foi instalado seguindo o delineamento de blocos a acaso com quatro repetições. As parcelas experimentais foram constituídas de 5 m de largura por 8 m de comprimento, o que totalizava 40 m². Nas três safras conduzidas na unidade a variedade utilizada foi a Brasmax Domínio IPRO pertencente ao grupo de maturação 8.4 com hábito de crescimento indeterminado e alta exigência nutricional.

Tabela 5. Análise química do solo antes da implantação do experimento em Jaborandi-BA.

Camada (cm)	Argila	V%	MOS	pH CaCl ₂	CTC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K	P _{Meh-1}	B
	g/kg	-----%-----				---cmolc dm ⁻³ ----		-----mg dm ⁻³ -----		
0-20	195	54,5	1,1	5,6	4,7	17	0,8	101,66	25,4	0,55

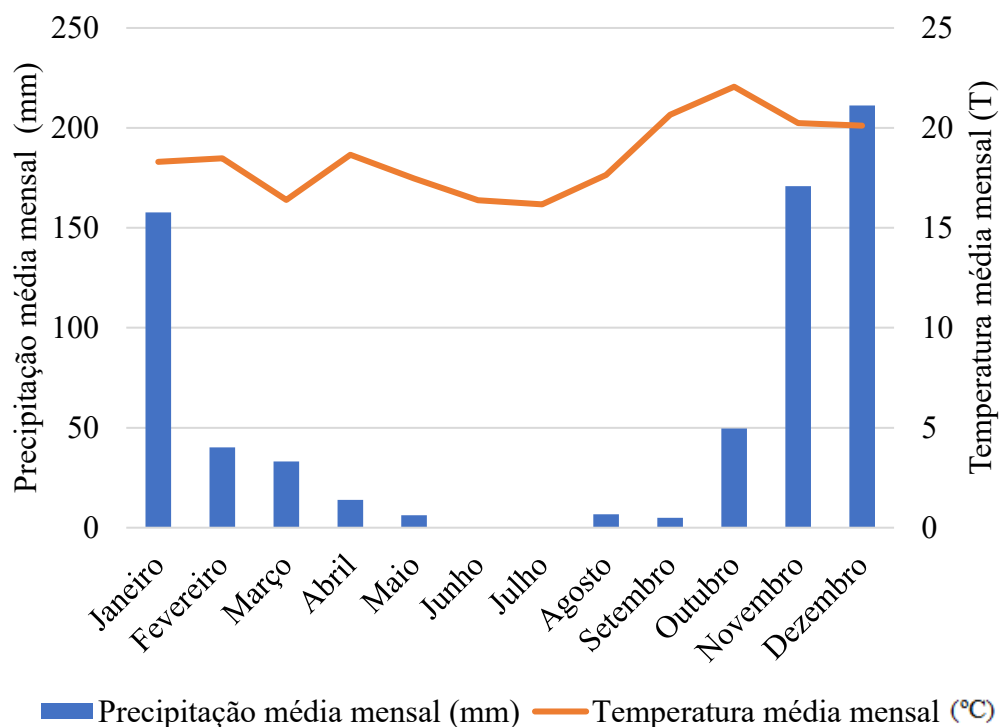


Figura 5. Temperatura e precipitação média da região de Jaborandi no estado da Bahia entre as safras de 2021/22 e 2023/24. Fonte: INMET, 2024.

Para todas as estações a partir dos laudos de análises de solo foram feitas correções para elevação dos níveis de P e K além de aumento da saturação de bases (V%). Para a nutrição da cultura toda fertilização seguiu como recomendação segundo EMBRAPA (2009).

2.2. TRATAMENTOS E DELINEAMENTOS

Durante a condução dos ensaios, avaliou-se a resposta da cultura da soja e milho à nutrição com boro, utilizando quatro diferentes fontes comerciais: Ácido Bórico (H_3BO_3), Octaborato de Sódio ($Na_2B_8O_{13} \cdot 4H_2O$), Ulexita ($NaCaB_5O_6(OH)_6 \cdot 5H_2O$) e Tetraborato de Sódio ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) (Tabela 6). Os tratamentos foram divididos em dois grandes grupos e as fontes foram aplicadas a lanço no pré-plantio da cultura da soja. O primeiro grupo avaliou a resposta a doses anuais de boro, variando de 0,5 a 2 kg de B ha^{-1} , aplicadas antes do plantio da safra de verão, com o objetivo de atender ao requerimento total da cultura para uma produção de 4,8 t ha^{-1} , cerca de 369,6 g do elemento (EMBRAPA, 2004).

Tabela 6- Descrição das fontes de boro utilizadas nos experimentos

Fonte	Fórmula química	Concentração de B (%)	Natureza Física
Ácido bórico	H_3BO_3	17	Pó
Octaborato de sódio	$\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	20,5	Pó
Tetraborato de sódio	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	15	Granulado
Ulexita	$\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	10	Granulado

Também foi testado o potencial de resposta a doses superiores, extrapolando o requerimento nutricional da soja em 2 e 6 vezes. As 4 estações apresentavam teores de argila variando entre 55 e 19%. Para o entendimento do potencial de resposta a doses maiores em solos com diferentes texturas foram formados três grupos: Textura argilosa (Rio verde e Cristalina), Textura média (Catalão) e Textura arenosa (Jaborandi). Cada uma das fontes foi aplicada a lanço antes do plantio, conforme as doses respectivas de cada tratamento. Os tratamentos que avaliaram as respostas anuais (Tabela 7) da cultura foram repetidos em todas as estações experimentais, com as mesmas fontes, épocas e formas de aplicação.

Tabela 7. Descrição dos tratamentos relativos as aplicações anuais de boro. Controle sem a aplicação de boro e 4 fontes com aplicações de 0,5, 1 e 2 kg de boro por hectare anualmente.

Fonte de Boro	Tratamento	Dose de B.ha ⁻¹ .ano ⁻¹
Controle	1	0
	2	0,5
Ácido Bórico	3	1
	4	2
Octaborato de Sódio	5	0,5
	6	1
	7	2
Tetraborato de Sódio	8	0,5
	9	1
	10	2
Ulexita	11	0,5
	12	1
	13	2

O segundo grupo de tratamentos Rio Verde (Tabela 8), Catalão (Tabela 9), Jaborandi (Tabela 10) e Cristalina (Tabela 11) compreende a avaliação da frequência de aplicação da nutrição com boro. Toda a base teórica a respeito da dinâmica química do elemento no solo é utilizada como base para a recomendação de aplicação de doses anuais do elemento, com a justificativa de que caso não seja ofertado naquele ano, se tenha uma perda de potencial produtivo. Tendo em vista isso, foram incluídos tratamento que avaliaram a resposta a aplicações bienais e trienais, isto é uma dose correspondente a 2 ou 3 anos no primeiro ano do cultivo, com o objetivo de se avaliar o efeito residual de uma dose mais elevada.

Tabela 8. Descrição dos tratamentos relativos as estratégias de reaplicação de boro em Rio Verde-GO. Estratégia de aplicação, fonte de boro utilizada, dose global aplicada (B. kg ha⁻¹) e anos de aplicação de cada dose. (-) sem ano experimental, 0= sem aplicação de boro.

	Frequência	Fonte	B.kg ha ⁻¹	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23
Rio Verde -GO	Trienais	ACB	3	3	0	0	-	-
			6	6	0	0	-	-
		OCT	3	3	0	0	-	-
			6	6	0	0	-	-
		TET	3	3	0	0	-	-
			6	6	0	0	-	-
		ULE	3	3	0	0	-	-
			6	6	0	0	-	-
	Bienais	ACB	2	-	-	-	2	0
			4	-	-	-	4	0
		OCT	2	-	-	-	2	0
			4	-	-	-	4	0
		TET	2	-	-	-	2	0
			4	-	-	-	4	0
		ULE	2	-	-	-	2	0
			4	-	-	-	4	0

ACB: ácido bórico; OCT: octaborato de sódio; TET: tetraborato de sódio e ULE: ulexita.

Tabela 9. Descrição dos tratamentos relativos as estratégias de reaplicação de boro em Catalão-GO. Estratégia de aplicação, fonte de boro utilizada, dose global aplicada (B. kg ha⁻¹) e anos de aplicação de cada dose. 0 = sem aplicação de boro.

	Frequência	Fonte	B.kg ha ⁻¹	19-20	20-21	21-22
Catalão -GO	Trienais	ACB	3	3	0	0
			6	6	0	0
		OCT	3	3	0	0
			6	6	0	0
		TET	3	3	0	0
			6	6	0	0
		ULE	3	3	0	0
			6	6	0	0

ACB: ácido bórico; OCT: octaborato de sódio; TET: tetraborato de sódio e ULE: ulexita.

Tabela 10. Descrição dos tratamentos relativos as estratégias de reaplicação de boro em Jaborandi-BA. Estratégia de aplicação, fonte de boro utilizada, dose global aplicada (B. kg ha⁻¹) e anos de aplicação de cada dose. 0 = sem aplicação de boro.

	Frequência	Fonte	B.kg ha ⁻¹	21/22	22/23	23/24
Jaborandi - BA	Trienais	ACB	3	3	0	0
			6	6	0	0
		OCT	3	3	0	0
			6	6	0	0
		TET	3	3	0	0
			6	6	0	0
		ULE	3	3	0	0
			6	6	0	0
	Bienais	ACB	4	2	0	2
			8	4	0	4
		OCT	4	2	0	2
			8	4	0	4
		TET	4	2	0	2
			8	4	0	4
		ULE	4	2	0	2
			8	4	0	4

ACB: ácido bórico; OCT: octaborato de sódio; TET: tetraborato de sódio e ULE: ulexita.

Tabela 11. Descrição dos tratamentos relativos as estratégias de reaplicação de boro em Cristalina-GO. Estratégia de aplicação, fonte de boro utilizada, dose global aplicada (B. kg ha⁻¹) e anos de aplicação de cada dose. 0 = sem aplicação de boro.

	Frequência	Fonte	B.kg ha ⁻¹	22/23	22/24
Cristalina	Bienais	ACB	4	4	0
		OCT	4	4	0
		TET	4	4	0
		ULE	4	4	0

ACB: ácido bórico; OCT: octaborato de sódio; TET: tetraborato de sódio e ULE: ulexita.

2.3. AVALIAÇÕES DO EXPERIMENTO

A avaliação da produtividade, expressa em sacas por hectare (sc ha⁻¹), foi realizada por meio de colheita manual, considerando as quatro linhas centrais de cada parcela experimental. Após a colheita, o material foi submetido ao processo de limpeza e, em seguida, foi efetuada a pesagem e a determinação da umidade dos grãos. A produtividade foi calculada com a umidade corrigida para 13%, valor considerado ideal para a armazenagem de grãos. A partir desse ajuste, os dados obtidos foram extrapolados para estimar a produtividade por hectare.

Para a determinação da massa de mil grãos (g), foram coletadas amostras representativas de cada parcela. A contagem dos grãos foi realizada de forma automatizada utilizando o equipamento CSP 10-SEED, que assegura precisão na separação de 100 unidades. Posteriormente, procedeu-se à pesagem das amostras e à determinação da umidade dos grãos, sendo os dados corrigidos para 13% de umidade, atendendo ao padrão ideal para armazenagem. Os valores foram convertidos para o equivalente a 1000 grãos e foram devidamente tabulados para análise.

A amostragem de tecido foliar foi conduzida durante o estágio reprodutivo da cultura, momento em que foram retirados o terceiro trifólio completamente expandido, a partir do ápice, de quatro plantas por parcela. Cada parcela contribuiu com, em média, quatro a cinco trifólios compondo uma única amostra representativa do tratamento. O material coletado foi acondicionado adequadamente em sacos de papel e encaminhado ao laboratório, onde foi submetido a processos de secagem e análises das concentrações dos elementos no tecido vegetal, segundo Malavolta et al. (1977).

A coleta de raízes foi realizada utilizando um trado específico, com cilindro de aproximadamente 20 cm de profundidade. Essa amostragem abrangeu quatro plantas por parcela, preferencialmente nas linhas de bordadura. Após a coleta, as raízes foram lavadas cuidadosamente para remoção de impurezas e, posteriormente, acondicionadas sob refrigeração. Em seguida, as amostras foram submetidas à secagem, em estufa, até a obtenção de peso constante, sendo então pesadas e os dados registrados para análise.

Em cada uma das localidades experimentais, foram realizadas coletas de solo antes da instalação dos experimentos e ao final de cada ciclo de reaplicação das doses bi/trienais. A amostragem foi executada utilizando-se o trado holandês para a coleta das amostras nas camadas 0-20 e 20-40 cm (Embrapa, 2006). As determinações analíticas das amostras foram realizadas conforme os procedimentos descritos em Embrapa (2009). Além disso, foi realizada uma análise detalhada do perfil de boro (B) no solo na estação de Rio Verde, com o intuito de entender o processo de lixiviação.

O delineamento experimental foi blocos casualizados com 4 blocos, com 4 fontes, 3 doses anuais, e 2 estratégias de reaplicação (bienais e trienais), a equação do modelo estatístico pode ser representada como:

$$Y_{ijklm} = \mu + F_i + D_j + S_k + (F \times D)_{ij} + (F \times S)_{ik} + (D \times S)_{jk} + (F \times D \times S)_{ijk} + B_l + \varepsilon_{ijklm}$$

No modelo estatístico adotado, a variável resposta $Y_{(ijklm)}$ é decomposta em diversos termos que capturam os efeitos dos fatores experimentais e suas interações. O termo μ representa a média geral do experimento, enquanto F_i , D_j e S_k correspondem, respectivamente, aos efeitos principais dos fatores fonte, dose e estratégia. As interações bilaterais $(F \times D)_{ij}$, $(F \times S)_{ik}$ e $(D \times S)_{jk}$ avaliam o efeito combinado de dois fatores, e a interação tripla $(F \times D \times S)_{ijk}$ evidencia a variação decorrente da simultânea influência dos três fatores. Adicionalmente, o efeito do bloco é representado por B_l , e $\varepsilon_{(ijklm)}$ denota o erro experimental, englobando as variações não explicadas pelos efeitos já modelados.

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade e homogeneidade de variâncias, seguidos pela análise conjunta de variância (ANOVA) e pelo teste F e em casos de interações significativos as regressões foram ajustadas para os experimentos ano a ano e para a avaliação

conjunta das doses anuais. Todas as análises foram feitas com a versão 3.6.3 do software R (R Development Core Team, 2019). Os estudos de comparação médias, quando o teste F foi significativo, foram avaliados a partir do teste Tukey a 5% de probabilidade. Para investigar as correlações entre os teores foliares dos elementos, foi aplicado o teste de correlação de Pearson. O Índice de Eficiência Agronômica (IEA) foi calculado de forma a possibilitar a comparação entre fontes na média global de doses anuais entre as estações e entre texturas baseado em Goedert et al. (1986). Para obtenção do Índice de eficiência agronômica (IEA) o incremento de produtividade sobre o controle da média das doses anuais para a fonte ácido bórico foi tomado como sendo 100% baseado em Goedert et al. (1986). Sendo, $IEA_{\text{fonte}} = 100 \times (\text{Ganho da fonte sobre o controle}) / (\text{Ganho do Ácido Bórico sobre o controle})$. A partir deste entendimento, foram calculados os IEA de cada uma das fontes para as 3 texturas de solo estudadas.

3. RESULTADOS

3.1. ESTUDO DE RESPOSTAS A NUTRIÇÃO COM BORO PELA CULTURA DA SOJA A PARTIR DE DOSES ANUAIS

Na avaliação conjunta do potencial de resposta do sistema produtivo a nutrição com boro, os tratamentos compostos por aplicações anuais do elemento (Com B) se mostraram superiores ao controle (Sem B) ao longo de todos os cultivos (Figura 6a) em cada estação Rio Verde (RV), Catalão (CAT), Jaborandi (JAB) e Cristalina (CRI). Os ganhos médios relativos ao a fornecimento de boro na média das fontes e das doses anuais variaram entre 2,18 a 11,05 sc ha⁻¹, com média de 5,97 sc ha⁻¹ de incremento quando comparado com o controle (Figura 6b).

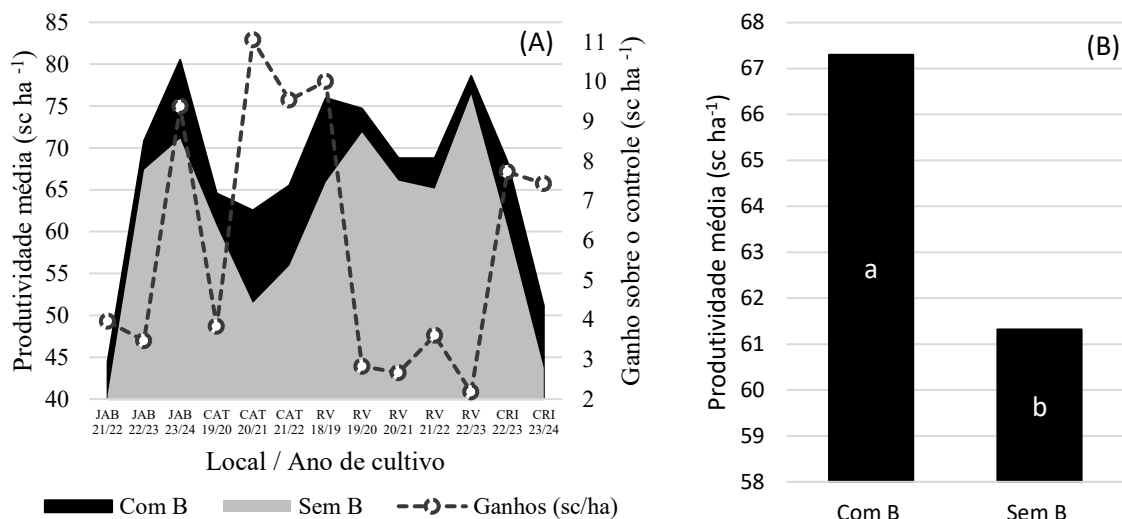


Figura 6. (A) Produtividade média de soja com (área escura na figura) e sem (área clara na figura) aplicação de boro a partir de doses anuais de B variando entre 0,5 e 2 kg de B ha⁻¹ via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em 4 locais experimentais ao longo de 13 cultivos e ganhos em relação a controle médio dos tratamentos (linha pontilhada – eixo y auxiliar) e (B) produtividade média das doses anuais e controle sem B. Letras minúsculas correspondem a diferenças para a média dos tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os incrementos produtivos relacionados a aplicação de boro variaram entre os anos e entre as estações. Para os cultivos na Bahia os incrementos variaram de 3,96 a 9,38 sc ha⁻¹, com destaque para o cultivo 23/24 com o maior incremento médio. Nos cultivos realizados na estação de Catalão os incrementos variaram entre 3,83 a 11,05 sc ha⁻¹, sendo este último o ano com maior incremento da série de dados global.

Na unidade de Rio Verde os incrementos variaram entre 2,18 e 10,01 sc ha⁻¹, sendo o primeiro ano de experimento aquele com maior resposta observada. Em Cristalina nos dois

anos avaliados, os ganhos relativos a aplicação de boro variaram entre 7,43 e 7,73sc. A estação com maior média de incremento foi a localizada em Catalão, com incremento médio de 8,14 sc ha⁻¹, seguida por Cristalina, Jaborandi e Rio Verde com média de incremento de 7,58 , 5,6 e 4,26 sc ha⁻¹, respectivamente.

As diferentes condições climáticas e de textura de solo tiveram interações com o potencial de resposta a doses superiores ao requerimento nutricional (Figura 7). Todas as doses anuais foram superiores ao controle para a média das estações e para o agrupamento Textura argilosa (Rio Verde e Cristalina-GO), Textura Média (Catalão-GO) e Textura arenosa (Jaborandi-BA). Os resultados direcionam a um entendimento de que doses superiores a 1 kg ha⁻¹ em solos de textura arenosa reduzem a produção, possivelmente por algum efeito tóxico da elevada concentração do elemento nos tecidos. Para outras 3 condições a porcentagem de incremento em relação ao controle foi superior na dose de 2 kg de B ha⁻¹ com média de 14,03% e 6,04% para textura argilosa e textura média, respectivamente. Para a estação de Jaborandi-BA o maior incremento médio, 7,83% em relação com controle, foi obtido na dose de 1 kg ha⁻¹ de B anualmente, sendo maior quando comparado a dose de 2kg ha⁻¹.

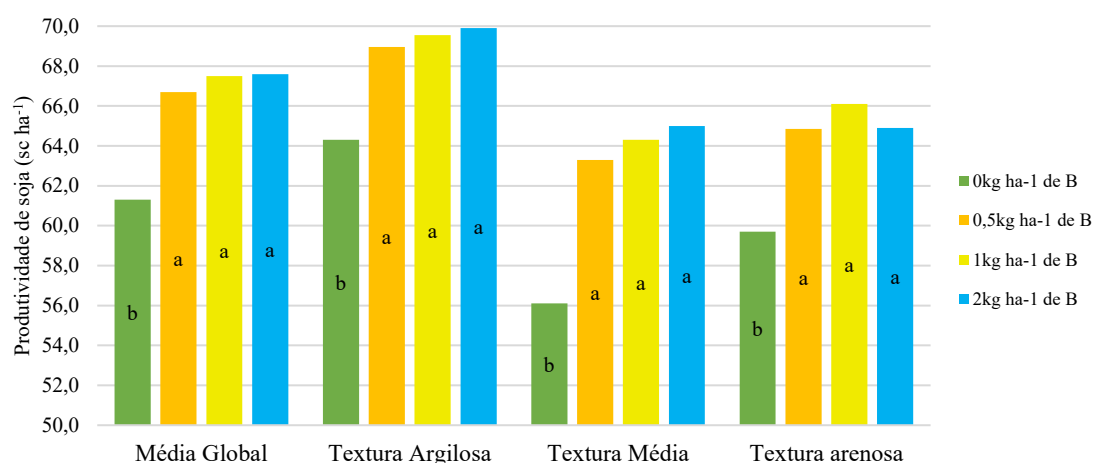


Figura 7. Produtividade média de soja (sc ha⁻¹) do controle e de doses anuais de B de 0,5, 1 e 2 kg ha⁻¹ via ácido bórico, octaborato, tetraborato e ulexita para a média das localidades e para os agrupamentos

texturais. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as doses para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.2. ESTUDO DE RESPOSTAS A NUTRIÇÃO COM BORO PELA CULTURA DA SOJA POR DIFERENTES FONTES

Para a avaliação do efeito isolado de cada uma das fontes de boro utilizadas ao longo dos cultivos, as médias de produtividade das doses anuais de 0,5, 1 e 2 kg de B ha⁻¹ foram analisadas (Figura 8) e houve diferença significativa entre as fontes ($p < 0,05$).

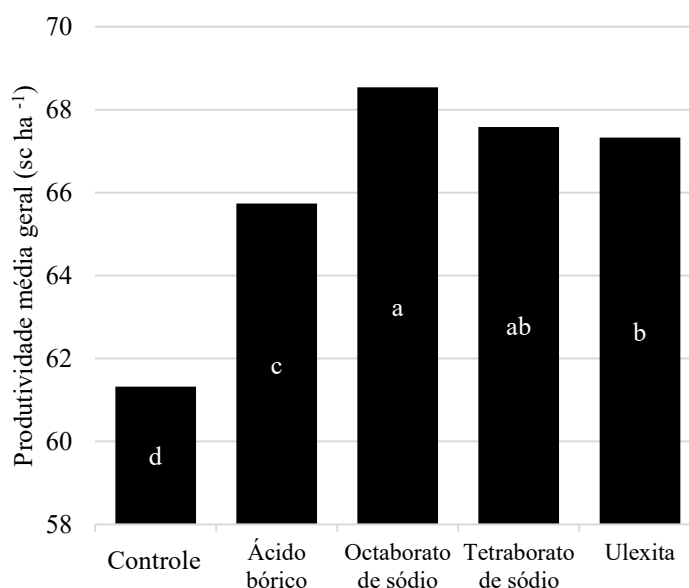


Figura 8. Produtividade média de soja (sc ha⁻¹) a partir de doses anuais de B de 0,5, 1 e 2 kg de B ha⁻¹ via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em quatro locais experimentais ao longo de 13 cultivos. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O rendimento produtivo da cultura da soja foi influenciado pela fonte de boro utilizada. Em 13 cultivos realizados nas estações experimentais localizadas nas cidades de Catalão, Rio Verde, Cristalina e Jaborandi, independente da fonte utilizada observou-se ganhos de produtividade quando comparada ao controle ($p < 0,05$). Dentre as fontes avaliadas, o octaborato de sódio mostrou-se superior quando avaliado o rendimento médio dos cultivos no conjunto de estações deste experimento em doses anuais de fornecimento do elemento e estatisticamente semelhante ao tetraborato de sódio. O ácido bórico foi capaz de aumentar o rendimento dos

cultivos de soja em relação ao controle, porém sendo a fonte com menor rendimento ($p < 0,05$). Os ganhos médios em relação ao controle foram de 4,42, 7,22, 6,27 e 6,00 sc ha^{-1} para o ácido bórico, o octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita, respectivamente.

A nutrição com boro foi capaz de aumentar a produtividade da cultura da soja na estação de Rio Verde, com incremento médio de 4,26 sc ha^{-1} nos 5 cultivos avaliados (Figura 9a). No primeiro ano experimental a fonte octaborato de sódio foi superior numericamente as demais fontes com produtividade média nas doses anuais de 77,7 sc ha^{-1} seguido da fonte tetraborato, ulexita e ácido bórico com produtividades médias de 76,7, 75,8 e 73,6 sc ha^{-1} , respectivamente (Figura 9a).

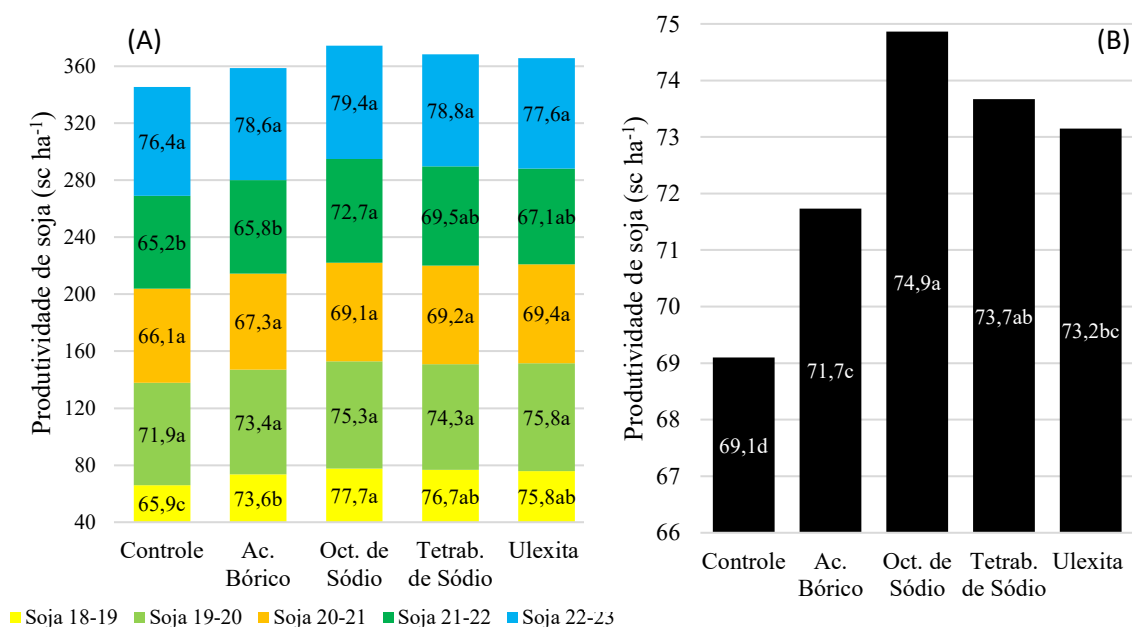


Figura 9. (A) Produtividade média de soja (sc ha^{-1}) a partir de doses anuais de B variando entre 0,5 e 2 kg de B ha^{-1} via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em Rio Verde-GO aplicadas no verão de cada ano. Barras empilhadas mostram produtividades médias das fontes nos cultivos de verão (soja) ao longo dos cultivos. (B) Produtividade médias das fontes e do controle ao longo dos cultivos. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A figura (Figura 9b) também ilustra o comportamento da produtividade média das fontes nas doses anuais de boro, sendo cada barra respectiva a uma fonte e a primeira barra ao controle. Na média dos 5 cultivos (Figura 9b) as 4 fontes foram superiores ao controle ($p < 0,05$). Para o teste Tukey a 5% a produtividade média do octaborato de sódio foi superior à produtividade média das demais fontes e estatisticamente semelhante à média do tetraborato de

sódio. O ácido apresentou o menor rendimento médio, sendo superior apenas ao controle sem boro e estatisticamente semelhante a ulexita.

Nas safras dos anos de 2019/20, 2020/21 e 2022/23 não houve diferença estatística (Figura 9a) entre as fontes para o teste Tukey a 5%. Embora não se observem diferenças estatísticas nos três anos citados, as diferenças de produtividade entre as fontes foram consistentes com destaque para os boratos de sódio, o octaborato e o tetraborato. Na média final dos 5 cultivos o tratamento controle obteve rendimento médio de 69,1 sc ha⁻¹ e para as fontes estudadas as produtividades médias foram de 71,7, 74,9, 73,7 e 73,2 sc ha⁻¹ para ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita, respectivamente (Figura 9b).

Na estação de Catalão-GO os ganhos médios provindos da nutrição com boro atingiram a média de 8,14 sc ha⁻¹ nos três cultivos (Figura 10a) avaliados entre as safras de 2019/20 e 2021/22.

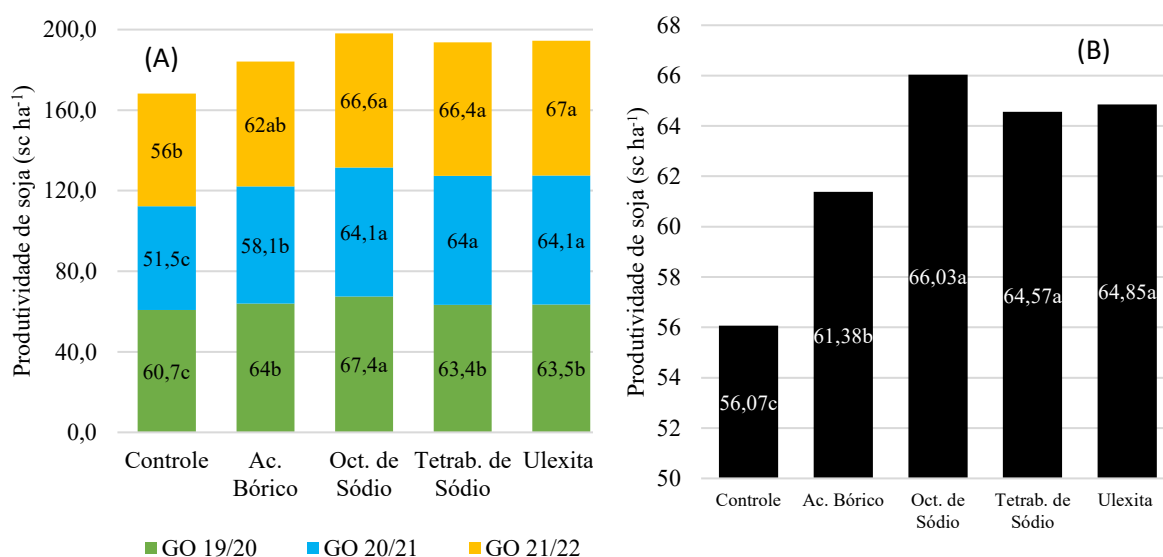


Figura 10. (A) Produtividade média de soja (sc ha⁻¹) a partir de doses anuais de B variando entre 0,5 e 2 kg de B ha⁻¹ via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em Catalão-GO e (B) Produtividade médias das fontes e do controle ao longo dos cultivos. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras empilhadas mostram produtividades médias das fontes nos cultivos de verão (soja) ao longo dos cultivos.

No primeiro ano experimental o octaborato de sódio foi superior estatisticamente as outras fontes de boro e ao controle ($p < 0,05$) com rendimento médio das doses anuais igual a 67,4 sc ha⁻¹, nos anos subsequentes as produtividades seguiram superiores estatisticamente ao controle (Figura 10a). A partir do segundo cultivo, as produtividades com as fontes octaborato, tetraborato de sódio e ulexita (Figura 10a) não diferiram estatisticamente e na média dos 3 anos os rendimentos (Figura 10b) foram 66,03, 64,57 e 64,85 sc ha⁻¹ para as fontes octaborato,

tetraborato e ulexita, respectivamente. No terceiro ano a soja obteve o maior rendimento médio de 66,98 sc ha⁻¹, com acréscimo de 11,02 sc ha⁻¹ em relação ao tratamento controle com a fonte ulexita. Na média dos 3 cultivos avaliados todas as fontes foram superiores ao controle (p<0,05). Dentre as fontes o ácido bórico obteve o menor rendimento (p<0,05) enquanto as demais fontes foram iguais estatisticamente. A diferença de acréscimo de produtividade em relação ao controle entre as fontes na média dos 3 cultivos foi de 5,32, 9,97, 8,5 e 8,78 sc ha⁻¹ para ácido bórico, octaborato, tetraborato e ulexita, respectivamente.

No ambiente de solo arenoso, na estação de Jaborandi-BA as repostas a nutrição com boro seguiram os padrões mais variados entre todas as estações, com duas fontes sendo superiores as outras em anos distintos.

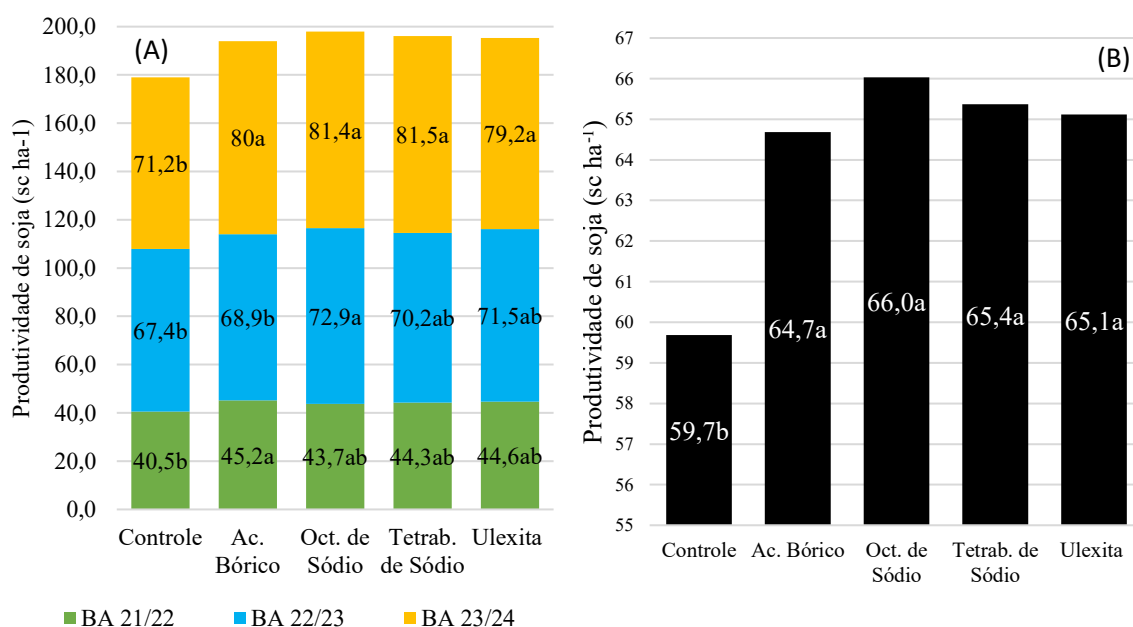


Figura 11. Produtividade média de soja (sc ha⁻¹) a partir de doses anuais de B variando entre 0,5 e 2 kg de B ha⁻¹ via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em Jaborandi-BA. Barras empilhadas mostram produtividades médias das fontes nos cultivos de verão (soja) ao longo dos cultivos. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey (p < 0,05).

No primeiro ano, safra de 2021/22 os rendimentos médios das fontes superaram o controle em 3,96 sc ha⁻¹ sendo o ácido bórico a fonte com maior rendimento (p<0,05) com uma produtividade média de 45,2 sc ha⁻¹ (Figura 11) sendo semelhante estatisticamente as demais fontes. No segundo ano o octaborato de sódio, foi superior aos demais tratamentos com uma produtividade média de 72,9sc ha⁻¹, sendo semelhante estatisticamente ao tetraborato de sódio e a ulexita (Figura 11a). No terceiro ano as fontes foram estaticamente iguais com diferenças de produtividade entre 0,8 e 1,5sc ha⁻¹ e com o tetraborato de sódio obtendo o maior rendimento.

Na média dos 3 anos (Figura 11b) avaliados, todas as fontes foram superiores ($p < 0,05$) ao controle com produtividades médias de 64,7, 66,0, 65,4 e 65,1 sc ha⁻¹ para ácido bórico, octaborato, tetraborato e ulexita, respectivamente. Numericamente foi observada uma variação entre as fontes, sendo que o ganho relativo ao controle para cada uma delas foi de 5,00, 6,35, 5,68 e 5,43 sc ha⁻¹ para ácido bórico, octaborato, tetraborato e ulexita, respectivamente.

Em Cristalina, (Figura 12a) durante os dois cultivos realizados, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre as fontes de boro avaliadas pelo teste Tukey a 5%, porém todas sendo superiores ao controle ($p < 0,05$). Na média dos dois anos, o incremento médio (Figura 12b) em relação ao controle foi de 7,58 sacas por hectare.

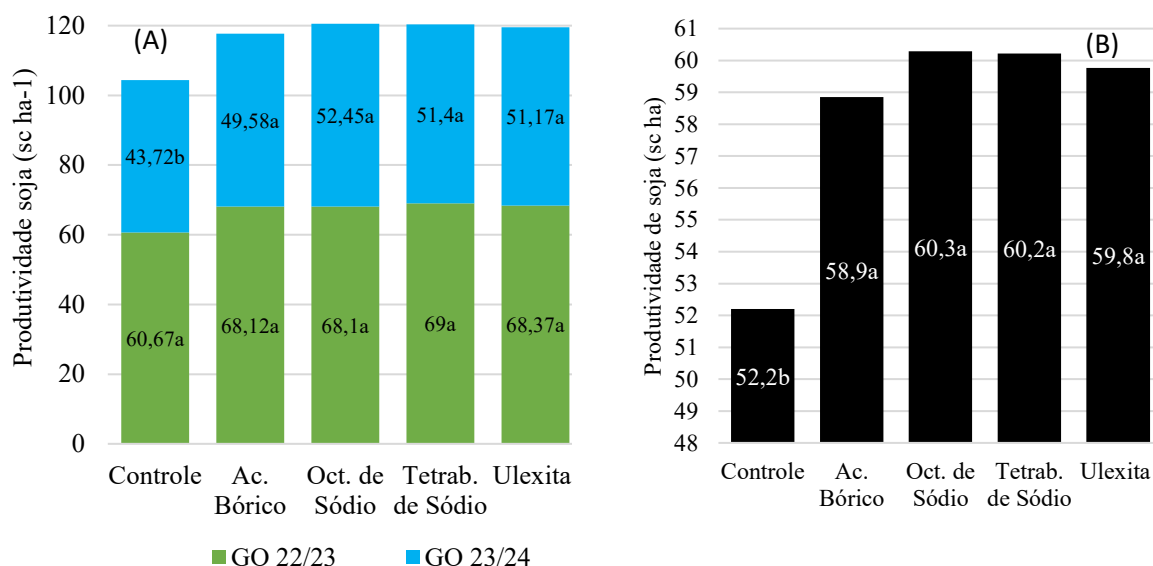


Figura 12. Produtividade média de soja (sc ha⁻¹) a partir de doses anuais de B variando entre 0,5 e 2kg de B ha⁻¹ via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em Cristalina-GO. Barras empilhadas mostram produtividades médias das fontes nos cultivos de verão (soja) ao longo dos cultivos. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Na safra 2022/23, o maior rendimento foi alcançado nos tratamentos com doses anuais de boro via tetraborato de sódio, enquanto no segundo cultivo, o octaborato de sódio obteve o maior rendimento, com 52,5 sacas por hectare (Figura 12a). Na média dos 2 anos (Figura 12b) avaliados, todas as fontes foram superiores ($p < 0,05$) ao controle com produtividades médias de 58,9, 60,3, 60,2 e 59,8 sc ha⁻¹ para ácido bórico, octaborato, tetraborato e ulexita, respectivamente. Numericamente foi observada uma variação entre as fontes, sendo que o ganho relativo ao controle para cada uma delas foi de 6,65, 8,08, 8,02 e 7,57 sc ha⁻¹ para ácido bórico, octaborato, tetraborato e ulexita, respectivamente.

A curva de resposta a nutrição com boro pela cultura da soja em doses anuais de 0,5, 1 e 2 kg de B ha⁻¹ das diferentes fontes estudadas na média das localidades apresentou comportamento polinomial quadrático (Figura 13). O coeficiente quadrático e linear da função, no interior dos gráficos, que descreve a curva de resposta da fonte ácido bórico apresentam o menor valor, evidenciando a menor eficiência da fonte. Cada fonte apresenta um padrão singular de resposta com diferentes graus de inclinação e pontos de máximo (Figura 13a , 13b 13c e 13d).

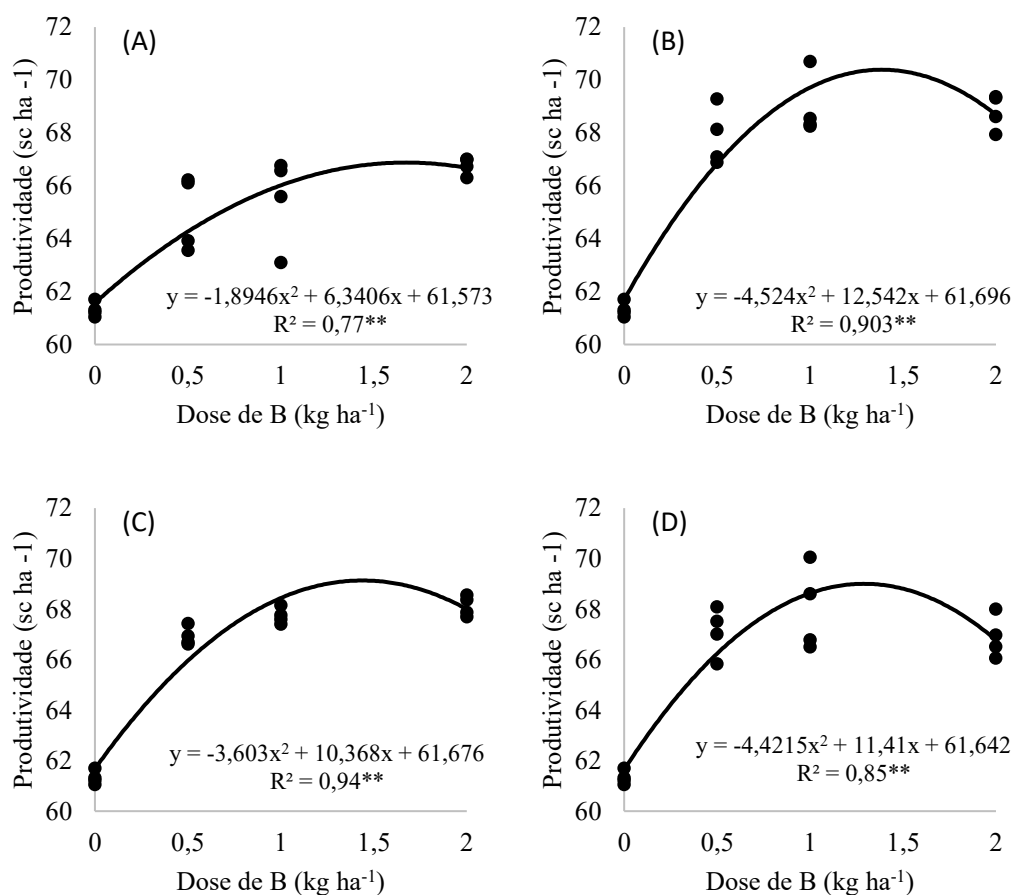


Figura 13. Curvas médias de resposta a doses anuais (0,5, 1 e 2 kg de B ha⁻¹) pela cultura da soja (sc ha⁻¹) em 13 cultivos via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita nas estações de Rio Verde, Catalão, Jaborandi e Cristalina. (A) ácido bórico, (B) octaborato de sódio, (C) tetraborato de sódio e (D) ulexita. ** significativo a 0,01% de probabilidade pelo teste F. Pontos representam as médias de cada local.

A resposta a nutrição com boro pela cultura da soja tem modelagem quadrática com valor de máximo rendimento superior ao requerimento nutricional da cultura da soja, cerca de 77 g de B por tonelada de grãos produzida (EMBRAPA, 2008). A curva de resposta segue uma forma típica de nutrição de plantas atingindo seu ponto de máximo e perdendo rendimento com

doses mais elevadas, principalmente no solo de textura mais leve. Para avaliação do efeito textual (Figura 14) sob cada fonte o agrupamento textura argilosa (Figura 14b) (Rio Verde 45% de argila e Cristalina-GO 55% de argila), para textura Média (Figura 14c) (Catalão-GO 33,12% de argila) e textura arenosa (Figura 14d) (Jaborandi-BA 19,5% de argila) foi feito.

Quando as curvas de resposta média das estações são plotadas e analisadas em conjunto (Figura 14a) é possível observar que existe uma predominância de superioridade da curva do octaborato de sódio em comparação com as demais, tanto nas médias dos locais como também nas diferentes texturas de solo (Figura 14b e 14c e 14d). É notável que a partir da diminuição dos teores de argila do solo existe um estreitamento da diferença entre as fontes em comparação aos solos de textura mais argilosa. O ácido bórico foi a fonte com a menor performance nas mais diferentes doses e texturas de solo exceto na textura arenosa onde se aproximou mais dos outros tratamentos em doses até 1 kg ha⁻¹. As curvas relativas aos rendimentos das fontes tetraborato de sódio e ulexita seguem um padrão semelhante de resposta, sendo as duas superiores ao ácido bórico na maioria das doses avaliadas.

Em relação a aplicação da dose de 1 kg de boro por hectare apresentou comportamento diferenciado em cada fonte e em cada textura. Para os solos de textura argilosa (Figura 14b), a aplicação de uma dose de 2 kg ha⁻¹ gerou ganhos de produtividade médio de 0,56% com variações de 3,11%, -0,99%, 1,15% e -1,02% para ácido bórico, octaborato, tetraborato e ulexita. No solo de textura média (Figura 14c) a aplicação de uma dose de 2 kg ha⁻¹ gerou ganhos de produtividade médio de 1,2% com variações de 5,52%, 1,96%, 0,30% e -2,99% para ácido bórico, octaborato, tetraborato e ulexita. E já no solo de textura arenosa (Figura 14d) para todas as fontes houve redução da produtividade com a aplicação de uma dose de 2 kg ha⁻¹, que em média gerou reduções de -1,73% e com variações de -4,29%, -0,39%, -0,56% e -1,67% para ácido bórico, octaborato, tetraborato e ulexita.

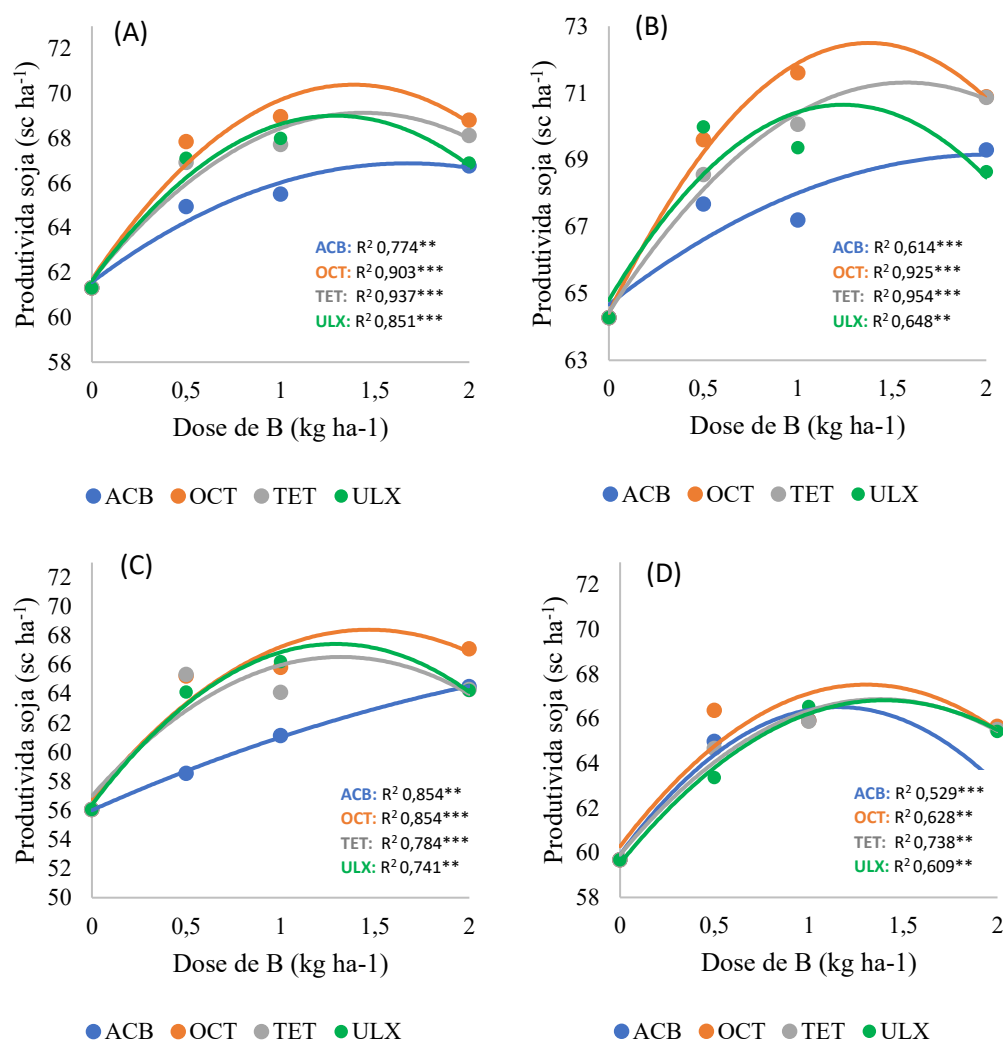


Figura 14. Curvas de resposta em produtividade de soja (sc ha⁻¹) a partir de 4 fontes de boro: ácido bórico (ACB), octaborato de sódio (OCT), tetraborato de sódio (TET) e ulexita (ULX) a partir de doses anuais de 0,5, 1 e 2 kg de B ha⁻¹. (A) Média de quatro locais, (B) Textura Argilosa, (C) Textura Média e (D) Textura arenosa. Linhas contínuas representam as equações das regressões polinomiais de cada uma das fontes. (***) $p < 0,001$ e (**) $p < 0,01$ significativo pelo teste F.

Nas doses de 0,5 kg ha⁻¹ de boro, a fonte com maior acréscimo em relação ao controle na condição de textura argilosa foi a ulexita com 8,89%, nas doses de 1 e 2 kg de boro o octaborato foi superior com 11,41% e 10,30% em relação ao controle. Na condição de textura média na dose de 0,5 kg ha⁻¹ o tetraborato de sódio obteve o maior acréscimo com 16,53% em relação ao controle, na dose de 1 kg de B ha⁻¹ o maior incremento foi o da ulexita com 18,08% em relação ao controle e na dose de 2 kg ha⁻¹ o octaborato apresentou o maior incremento com 19,69%. Na condição de textura arenosa o octaborato obteve os maiores incrementos nas doses de 0,5 e 1 kg ha⁻¹ e a ulexita na dose de 2 kg ha⁻¹, sendo os incrementos iguais a 11,22, 11,50, e 10,02% para as doses de 0,5, 1 e 2 kg de boro por hectare.

Observa-se uma larga vantagem (Tabela 12) da fonte solúvel alcalina (octaborato de sódio), principalmente no solo de textura média, e seguindo os gráficos já apresentados das curvas de resposta, temos uma redução dessa diferença no solo de textura mais arenosa.

Tabela 12 - Índices de eficiência agronômica para as fontes em aplicações anuais de boro em relação a fonte referência ácido bórico.

Fonte	Índice de Eficiência Agronômica (IEA)		
	Textura Argilosa	Textura Média	Textura arenosa
Ácido Bórico	100	100	100
Octaborato de Sódio	170	188	127
Tetraborato de Sódio	147	160	114
Ulexita	134	165	109

3.3. RESPOSTAS A NUTRIÇÃO RESIDUAL COM BORO PELA CULTURA DO MILHO POR DIFERENTES FONTES EM DOSES ANUAIS

Nos cultivos de inverno realizados na unidade de Rio Verde – GO, a cultura do milho também respondeu ao residual do fertilizante aplicado na cultura da soja. Em média a avaliação do efeito residual das doses anuais para a cultura de inverno (Figura 15) mostrou incremento de 24,8 sc ha⁻¹ em relação ao controle sem B. No primeiro cultivo 19/19 a ganho de produtividade pela cultura do milho em relação ao controle foi de 43 sc ha⁻¹ sendo o ano com maior incremento médio, seguido de 2020, 2021, 2023 e 2022 com incrementos médios de 30, 27, 13 e 10 sc ha⁻¹, respectivamente.

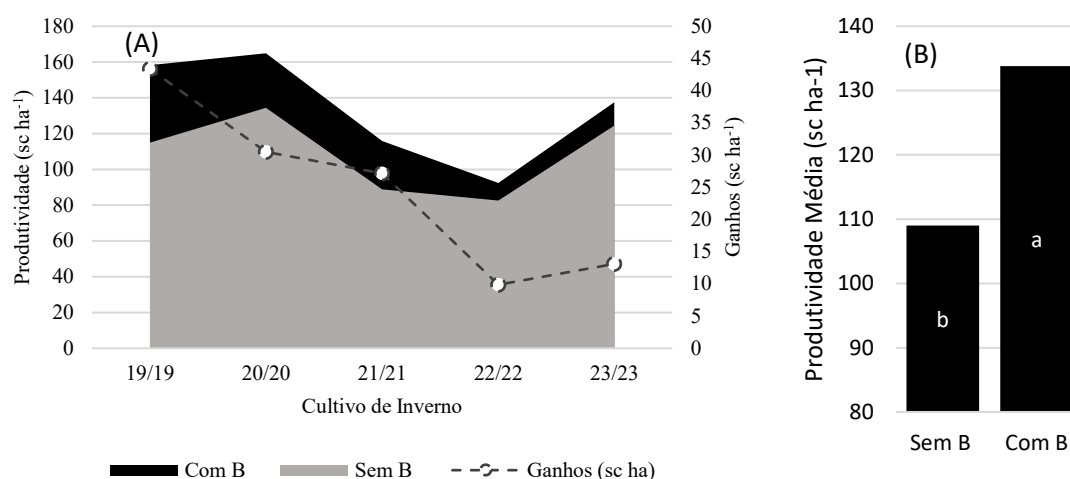


Figura 15 - (A) Produtividade média de milho com (área escura na figura) e sem (área clara na figura) aplicação de boro a partir de doses anuais (Com B) de B variando entre 0,5 e 2 kg de B ha⁻¹ via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em Rio Verde ao longo de 5 cultivos e ganhos em relação a controle (Sem B) médio dos tratamentos (linha pontilhada – eixo y auxiliar) e (B) produtividade média das doses anuais e controle sem B. Letras minúsculas correspondem a diferenças para a média dos tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Ao longo dos cultivos as produtividades variaram entre as fontes sendo superiores numericamente ao controle e todos os anos (Figura 16). Estatisticamente houve diferença entre as fontes no segundo ano sendo o octaborato de sódio superior as outras com produtividade média de 184,4 sc ha⁻¹ seguido pelo tetraborato de sódio, ácido bórico e ulexita (Figura 16a). No primeiro ano de cultivo do milho a maior produtividade foi do octaborato de sódio com produtividade de 162,00 sc ha⁻¹ e com diferença de 47,1 sc ha⁻¹ em relação ao controle. No segundo ano de cultivo a maior produtividade foi do octaborato de sódio com incremento de 50 sc ha⁻¹ em relação ao controle. Nos anos subsequentes, a fonte octaborato seguiu a tendência de rendimento superior aos demais tratamentos.

Assim como na cultura da soja, cada uma das fontes obteve rendimentos diferentes ao longo dos cultivos. A avaliação das médias das doses anuais de B mostrou que a fonte octaborato de sódio manteve-se superior as outras e ao controle (Figura 16b) e semelhantes estatisticamente ao tetraborato de sódio. Os incrementos médios de produtividade em relação ao controle foram de 20,6, 31,6, 25,0 e 21,9 sc ha⁻¹ para ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato e ulexita, respectivamente.

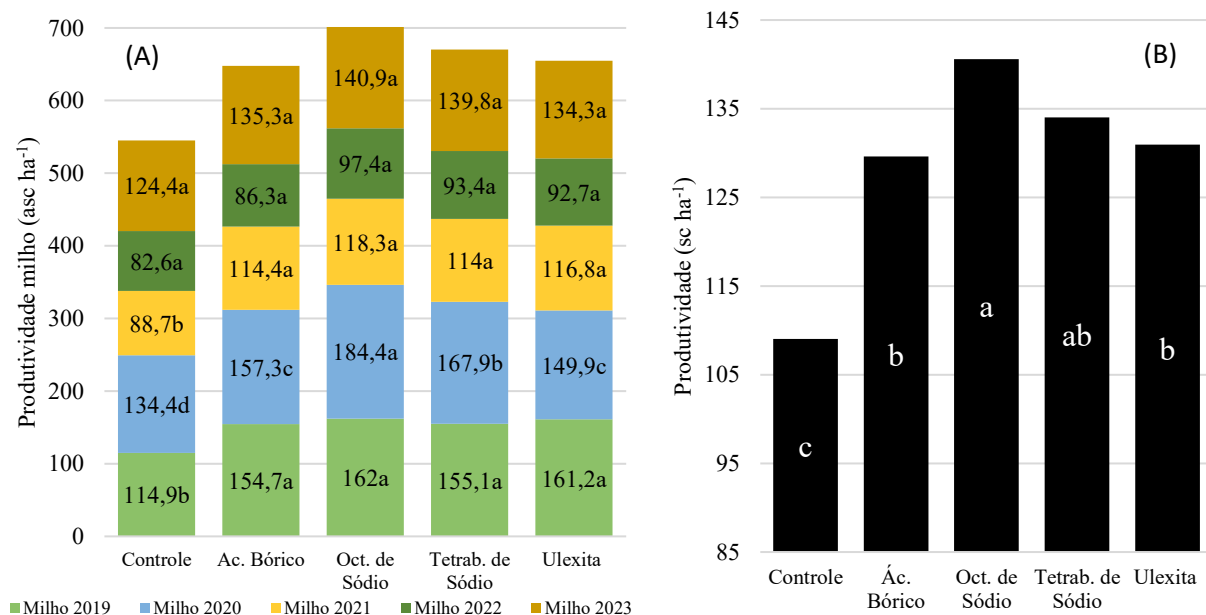


Figura 16. (A) Produtividade média de milho (sc ha⁻¹) a partir de doses anuais de B variando entre 0,5 e 2 kg de B ha⁻¹ via ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita em Rio Verde-GO aplicadas no verão de cada ano. Barras empilhadas mostram produtividades médias das fontes nos cultivos de inverno (milho) ao longo dos cultivos. (B) Produtividade média das fontes e do controle ao longo dos cultivos. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das fontes pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

As curvas de resposta da cultura do milho foram ajustadas para cada uma das fontes de B avaliadas. O coeficiente linear das curvas apresentou uma faixa de variação entre 1544,2 e 2992,5 evidenciando a diferença entre as fontes (Figura 17). Ao se avaliar a derivada de cada uma das funções polinomiais ajustadas os valores de X para o ponto de maior rendimento são 1,78, 1,71, 1,39, e 1,36 kg de B ha⁻¹ para ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato e ulexita, respectivamente.

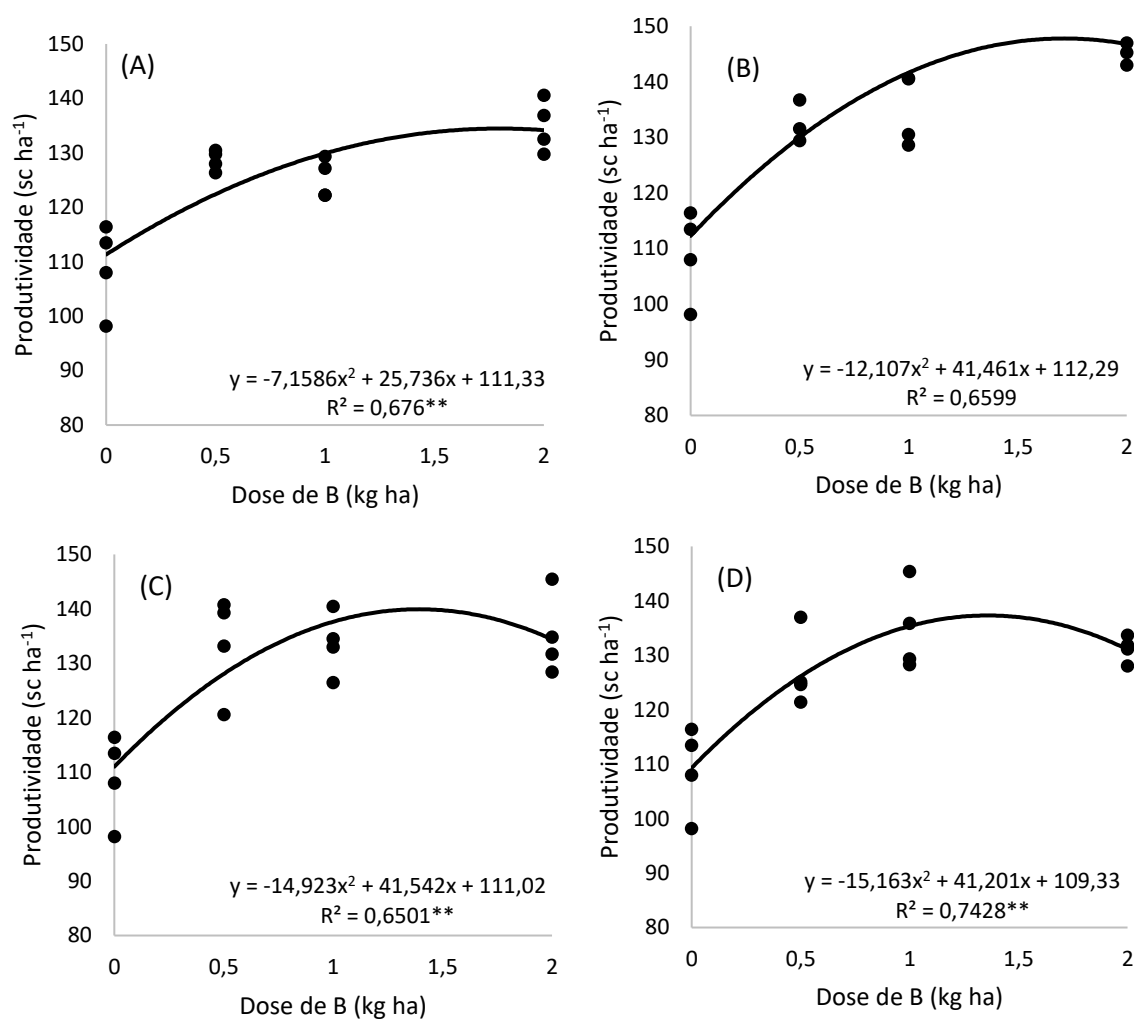


Figura 17. Produtividade média de cinco cultivos anual de milho (sc ha⁻¹) em doses anuais de B aplicadas via ácido bórico (A), octaborato de sódio (B), tetraborato de sódio (C) e ulexita (D) em doses anuais de 0,5, 1 e 2 kg de B ha⁻¹. Linhas contínuas representam as equações das regressões polinomiais de cada uma das fontes. ** significativo a 0,01% de probabilidade pelo teste F.

3.4. EFEITO DA NUTRIÇÃO COM BORO NOS PARÂMETROS PRODUTIVOS E NO STATUS NUTRICIONAL DA CULTURA DA SOJA

Além da avaliação do efeito da nutrição com boro na produtividade dos cultivos de soja, foram realizadas diversas análises que visaram correlacionar o aumento da produtividade com os parâmetros nutricionais e de crescimento das plantas. A massa seca de raízes foi avaliada e pode-se observar (Figura 18) que os tratamentos com aporte de boro levaram ao incremento

médio de 59% na massa de raízes em relação ao controle, com destaque para os tratamentos via octaborato de sódio e ulexita.

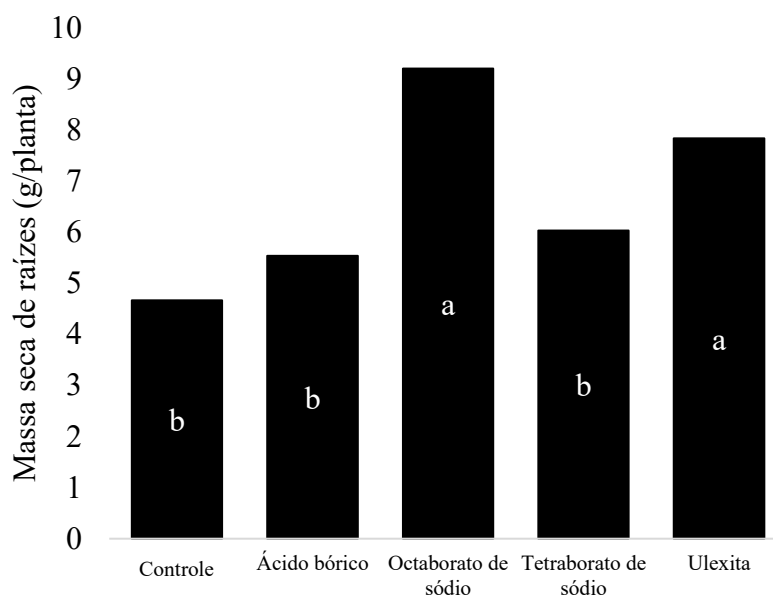


Figura 18. Massa seca de raízes soja (g/planta) na dose de 2 kg de B ha⁻¹ fornecidas por 4 diferentes fontes de boro a partir do fornecimento de 2 kg ha⁻¹ na estação de Catalão-GO. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Quando comparamos individualmente cada uma das fontes na dose de 2 kg de B ha⁻¹ o incremento médio em relação ao controle de massa seca de raízes foi de 19%, 97%, 29% e 68% para as fontes ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita, respectivamente. Durante os cultivos, amostragens foliares foram realizadas para entendimento do efeito nutricional de cada uma das fontes e das interações entre os teores foliares de B e outros elementos. Em diversas ocasiões os resultados foliares apresentaram uma alta correlação entre os teores de B foliar com outros elementos como K, P, S, Ca e Mg. A partir das correlações de Pearson entre os elementos foram encontrados os coeficientes 0.66, 0.35, 0.67, 0.61, e 0.66 ($p < 0,01$) para P, K, Ca, Mg e S respectivamente (Figura 19).

Foram encontradas correlações positivas e significativas de teores foliares de boro com diversos elementos como P, K, Ca, Mg e S. Além da correlação com microelementos como Zn, Mn e Fe. Os coeficientes de correlação de Pearson foram 0,66, 0,35, 0,67, 0,61, 0,66, 0,58, 0,56 e 0,51 para P, K, Ca, Mg, S, Zn, Mn e Fe, respectivamente. Não foram encontradas correlações negativas entre os teores de B e outros elementos nas amostras avaliadas. O maior coeficiente foi o que descreve as interações dos teores foliares de Ca e B.

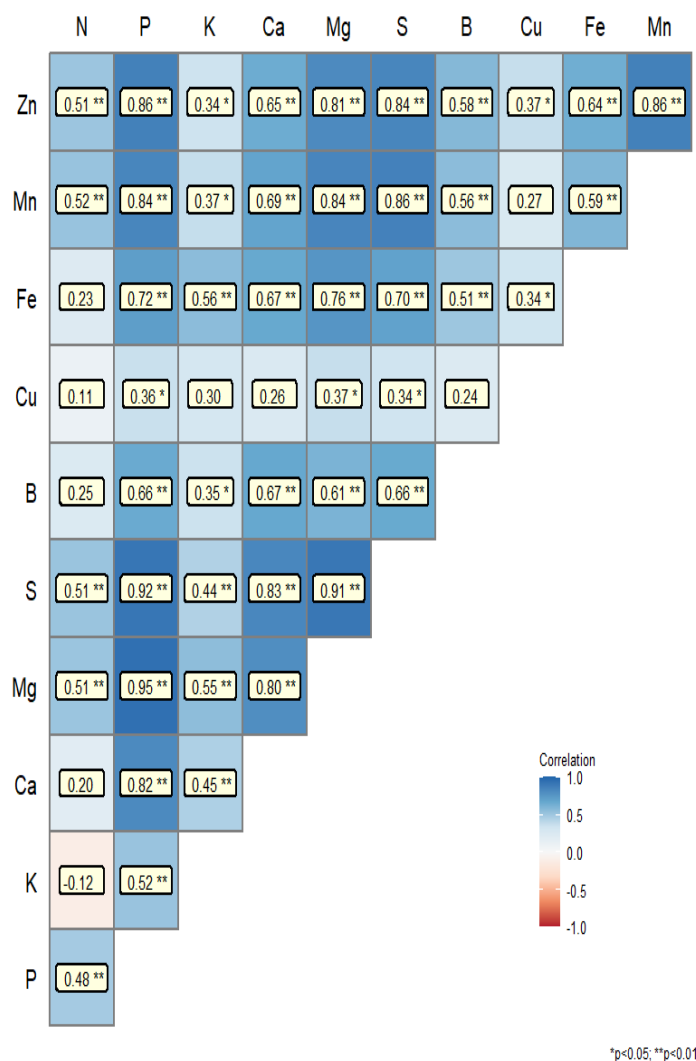


Figura 19. Coeficiente de correção de Pearson entre os teores foliares na cultura da soja de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn na estação de Jaborandi na safra 2023/24. A intensidade da cor, seja alta ou baixa, reflete a força da relação entre um par de elementos, com tons azuis indicando correlações positivas e tons vermelhos representando correlações negativas. Quanto mais próximo de um for o valor, mais forte será a correlação, enquanto valores próximos de zero indicam uma relação mais fraca entre as variáveis. Os símbolos * $p < 0,05$ e ** $p < 0,01$ demonstram a significância estatística da correlação entre os pares de características analisadas.

O aumento da produtividade do cultivo de soja tem relação direta com a melhoria dos parâmetros de crescimento do cultivo, em diversas condições experimentais foi observada uma relação positiva entre a nutrição com boro e o peso de mil grãos (PMG) (Figura 20). No terceiro ano de cultivo na estação de Jaborandi (Figura 20a) foi observada diferença entre as fontes na média do peso de mil grãos avaliado ($p < 0,05$). Além disso, a nutrição com boro aumentou o peso de mil grãos em 3,27% em relação ao controle (Figura 21b). Os ganhos relativos ao tratamento controle variaram entre 2,98 e 4,4%, sendo o tetraborato de sódio a fonte com maior incremento relativo (Figura 20a) e se assemelhando as demais fontes estatisticamente.

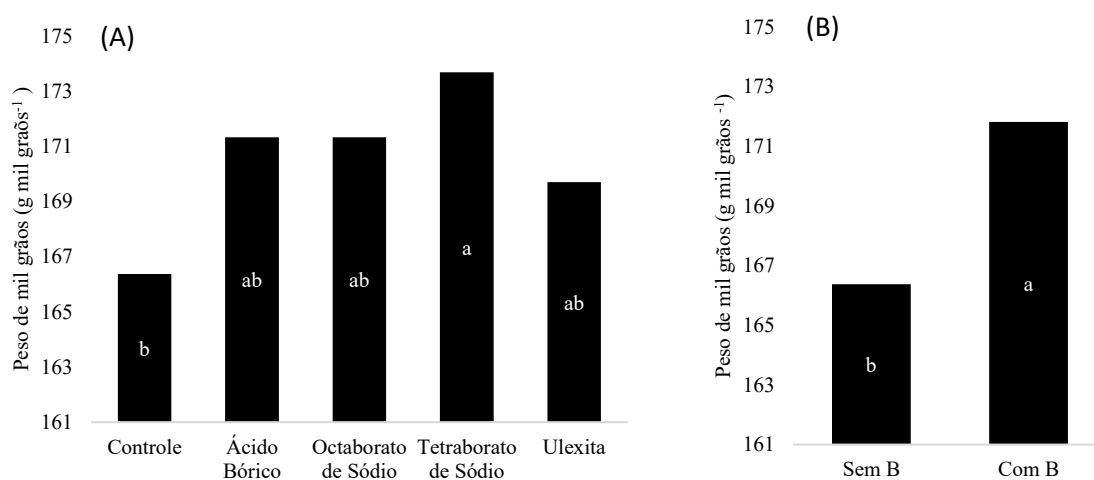


Figura 20. (A) Peso de mil grãos de soja (g mil grãos⁻¹) em resposta a diferentes fontes de boro (ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita) na safra 2023/24 na estação de Jaborandi-BA e (B) Efeito da nutrição com boro no peso de mil grãos. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Na estação de Catalão o peso de mil grãos também foi afetado pela nutrição com B. Nos dois primeiros anos avaliados o PMG foi superior ao do controle, com acréscimos de 3,85 e 5,21% no primeiro e segundo ano, respectivamente (Figura 21). No terceiro ano foi observada uma ligeira redução do PMG frente ao controle, no entanto com ausência de diferença estatística. Na média dos três anos avaliados, a nutrição com boro foi capaz de elevar o PMG em cerca de 2,8% ($p < 0,05$).

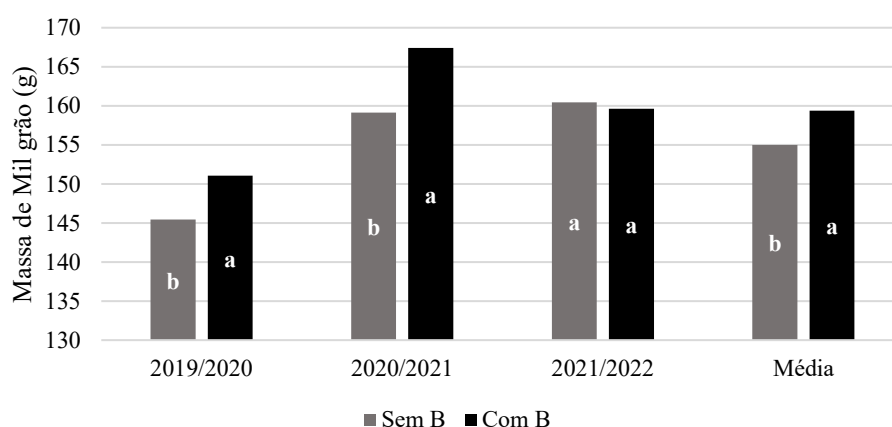


Figura 21. Peso de mil grãos de soja em resposta a diferentes doses (0,5, 1 e 2 kg de B ha⁻¹) e a partir de 4 fontes de boro (ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita) entre os cultivos de 2019/20, 2020/21 e 2021/22 na estação de Catalão-GO. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.5. EFEITOS DAS ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÕES ANUAIS E BI/TRIENAIIS DE BORO NAS CULTURAS DA SOJA E MILHO

Ao longo dos cultivos de soja e milho em doses bienais (Figura 22a) e no acumulado das doses bi/trienais (Figura 22c) a estratégia de reaplicação para as duas culturas não mostrou diferença estatística. Embora sem diferenças significativas, aplicação anual de B no sistema soja milho ao longo dos 10 cultivos teve incremento no acumulado em relação a aplicação trienal de 7,86 sc ha⁻¹ de soja e milho, porém não foram observadas diferenças estatísticas entre as estratégias para o teste Tukey ($p < 0,05$). Para o estudo avaliando doses trienais na cultura da soja, houve diferença estatística (Figura 22b) no primeiro o no último ano do ciclo. No primeiro ano a aplicação trienal foi superior, no segundo ano as estratégias foram iguais e no último ano a estratégia anual foi superior. Para as estratégias de reaplicação trienais na cultura do milho não houve diferença estatística.

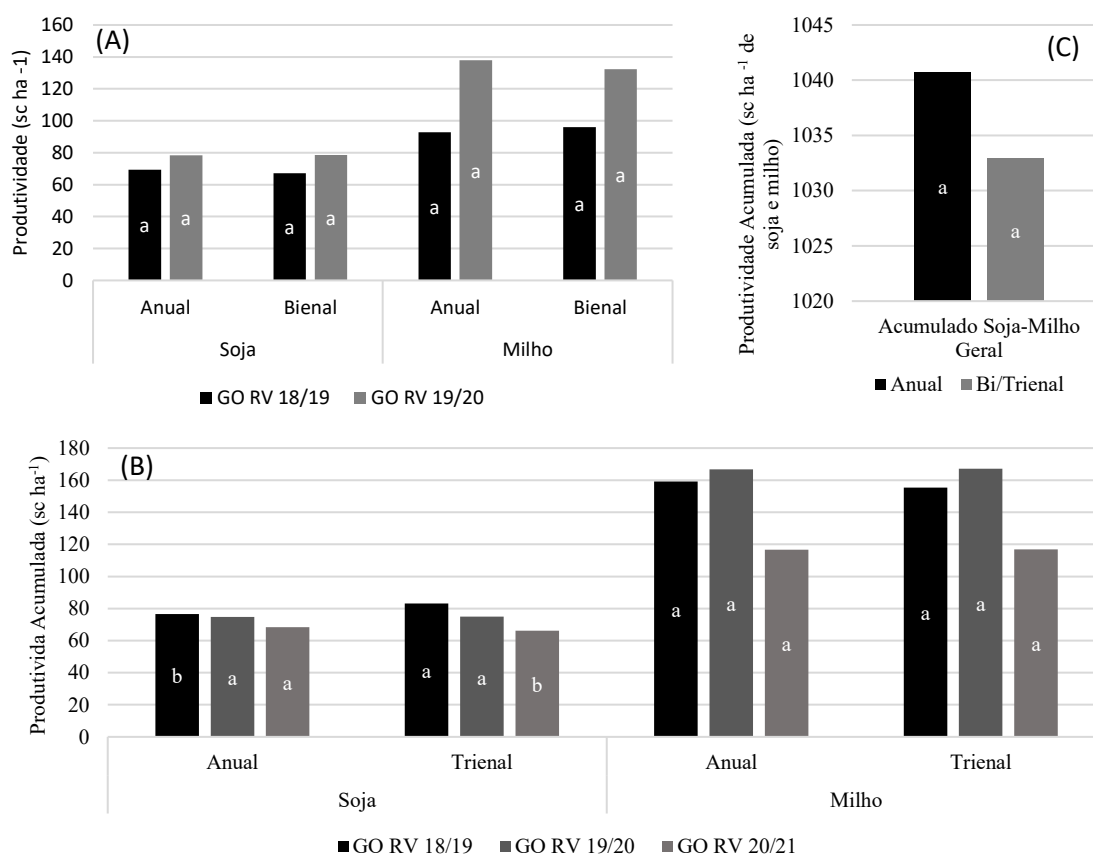


Figura 22. Produtividade média anual (sc ha⁻¹) no sistema soja milho em doses anuais e bienais (a) e anuais e trienais (b). Produtividade acumulada ao longo de 5 cultivos de soja e milho (c) na estação de Rio Verde-GO. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as estratégias e o acumulado das produtividades pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os resultados observados na estação de Catalão mostraram diferença estatísticas entre as estratégias de aplicação para o teste Tukey a 5%. No primeiro ano avaliado a aplicação das doses trienais se mostraram superiores a aplicação da dose anual. Já no segundo e terceiro o fornecimento anual de B foi superior ao fornecimento trienal (Figura 23a).

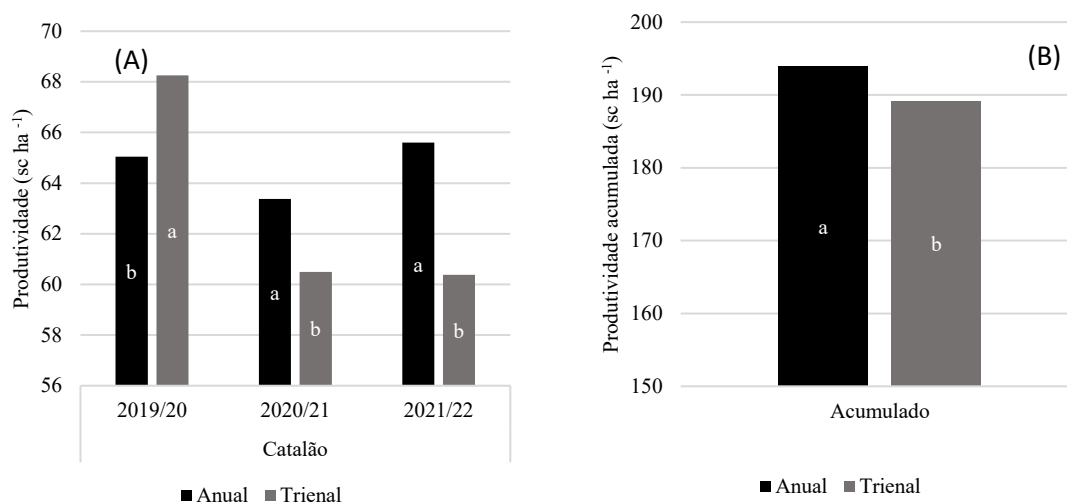


Figura 23. Produtividade média anual de soja (sc ha⁻¹) em anuais e trienais (A). Produtividade acumulada ao longo de 3 cultivos de soja (B) na estação de Catalão-GO. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as estratégias e os acumulados de produtividades pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A produtividade acumulada dos dois cultivos também sofreu influência da estratégia de reaplicação. A aplicação anual de boro gerou a produtividade acumulada de 194 sc ao longo dos 3 anos enquanto a estratégia trianual gerou o somatório de 189,13 sc (Figura 23b). A diferença entre as duas estratégias foi de 4,87 sc ha⁻¹ com diferença estatística para o teste Tukey ($p < 0,05$).

Na condição e textura arenosa, em Jaborandi-BA, a aplicação anual de B foi superior as duas outras estratégias avaliadas (Figura 24a). Para o bloco de avaliação da dose bienal, safras 2021/22 e 2022/23, a aplicação anual foi superior ano a ano e no acumulado (Figura 24a e 24b).

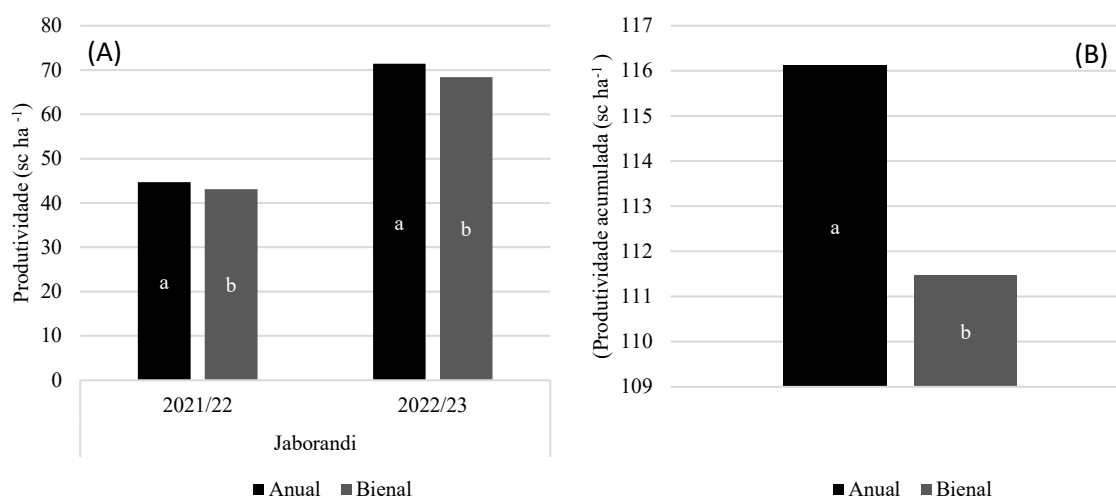


Figura 24. Produtividade média anual de soja (sc ha⁻¹) em anuais e bienais (A). Produtividade acumulada ao longo de 2 cultivos de soja (B) na estação de Jaborandi-BA. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as estratégias para o acumulado das produtividades pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para o bloco de avaliação das doses trienais (Figura 25a) a aplicação anual foi superior no primeiro, no segundo ano e no acumulado. No acumulado geral de produtividade (Figura 25b) a diferença entre a aplicação anual e bienal foi de 4,65 sc ha⁻¹ e para as doses trienais a diferença foi de 4,69 sc ha⁻¹ ($p < 0,05$).

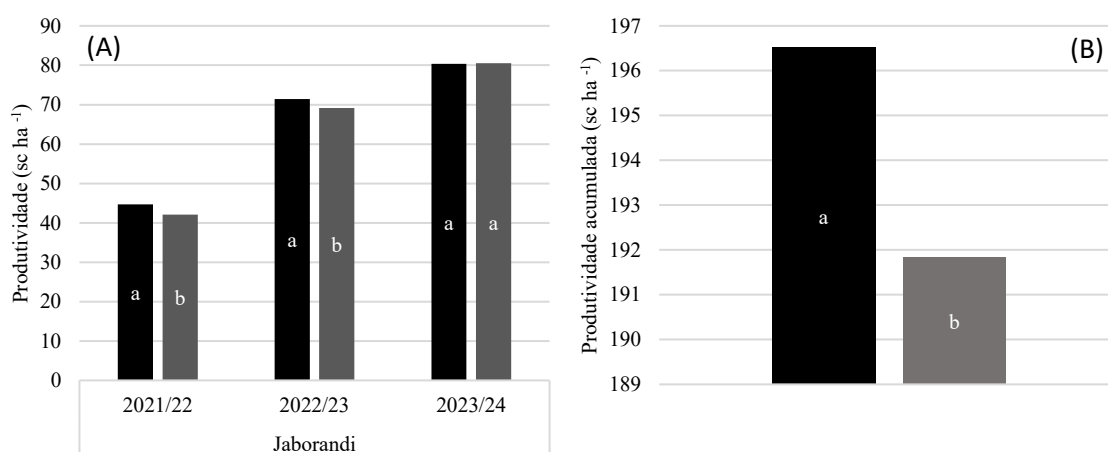


Figura 25. Produtividade média anual de soja (sc ha⁻¹) em anuais e trienais (A). Produtividade acumulada ao longo de 3 cultivos de soja (B) na estação Jaborandi-BA. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as estratégias e o acumulado das produtividades pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Nos dois cultivos em Cristalina-GO (Figura 26a e 26b) a avaliação da estratégia de reaplicação de boro não mostrou diferença estatística entre a estratégia de fornecimento anual e bienal apenas no primeiro ano. No acumulado dos dois anos avaliados a diferença de produtividade foi de 5 sc ha⁻¹, sendo a aplicação anual superior no primeiro ano e na média da produtividade dos cultivos, apesar da ausência de diferenças estatísticas.

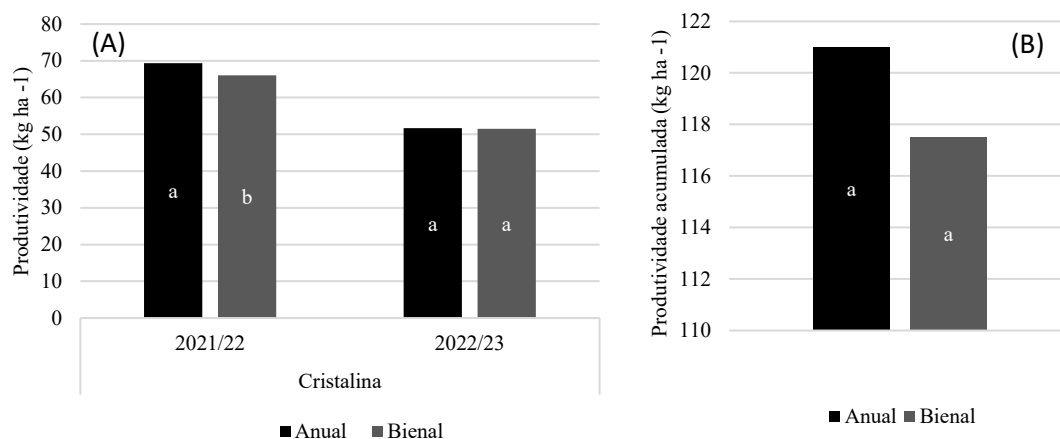


Figura 26. Produtividade média anual (sc ha⁻¹) em anuais e bienais (A). Produtividade acumulada ao longo de 2 cultivos de soja (B) em Cristalina-GO. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A avaliação conjunta do efeito da reaplicação anual de boro no sistema mostrou que a magnitude de resposta a aplicação anual tem relação com textura do solo (Figura 27). A superfície de resposta dos solos de textura média e arenosa, nos anos subsequentes a aplicação da dose trienal, mostrou média de incremento pela reaplicação de 3,43 sc ha⁻¹. Este fato sugere que em solos de textura leve, o acumulado de B aplicado tem rendimento inferior a aplicação anual do elemento, na estação da Bahia a aplicação de 1 ou 2 kg anualmente foi superior ao acumulado de 3 e 6 kg, respectivamente.

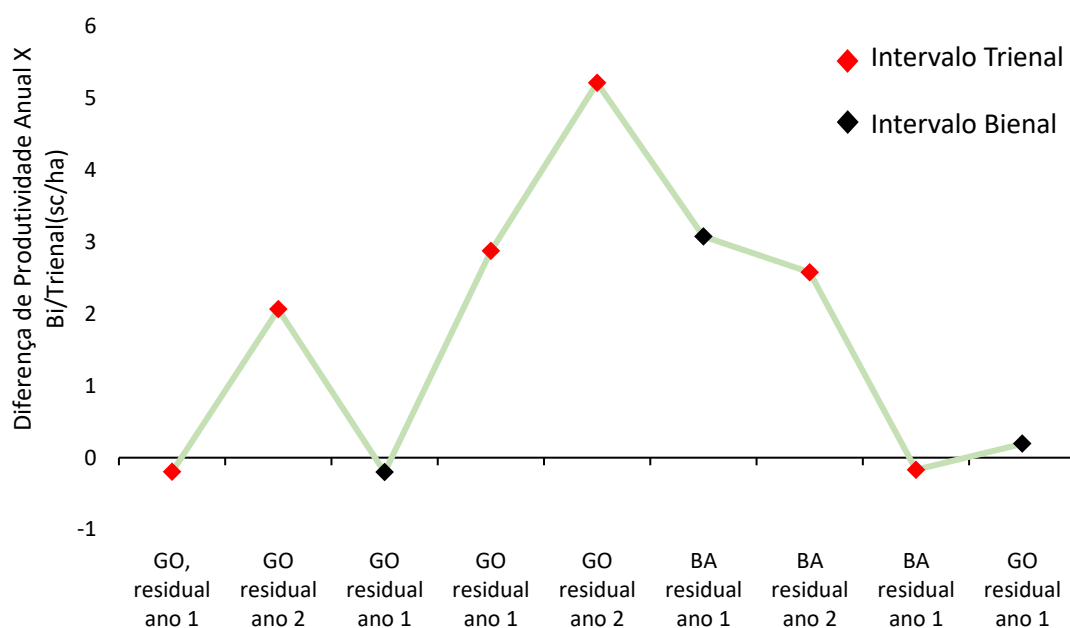


Figura 247. Diferença de produtividade entre a aplicação anual e tri/bienal de B nos anos subsequentes a aplicação inicial (sc ha^{-1}). Os intervalos de efeito residual após a aplicação da dose trienal são representados pelos marcadores vermelhos e para os blocos bienais pelos marcadores pretos.

O conjunto de tratamentos relativos à avaliação das respostas a reaplicação de boro foi agrupado e a partir dos acumulados de produtividade em cada ciclo de aplicação, segundo ano de doses bienais e terceiro ano de dose trienais, as interações entre fonte, dose e estratégia foram feitas (Tabela 13). Nas doses trienais avaliadas na estação de Rio Verde, não houve interação significativa. Para a estratégia bienal, houve interação entre as fontes e a estratégia de aplicação. Em Catalão as interações com significância foram fonte X dose e fonte X estratégia. Em ambas as estratégias em Jaborandi houve interações significativas sendo, fonte X dose para o grupamento trienal e dose X estratégia para o grupamento Bienal. Por fim, em Cristalina houve efeito significativo para todas as interações.

Tabela 13 - Tabela de Valores de Pr>Fc e CV (%) para Significância Estatística a partir da ANOVA para interações nas estratégias de reaplicação.

	Pr>Fc					
	RioVerde Tri	Rio Verde Bi	Catalão Tri	Jaborandi Tri	Jaborandi Bi	Cristalina Bi
Fonte X Dose	0,7405	0,3086	0,0006	0,0098	0,0675	0,013
Fonte X Estratégia	0,9029	0,0046	0,000	0,9194	0,8294	0,0001
Dose X Estratégia	0,6583	0,8731	0,1755	0,1648	0,0176	0,0062
Fonte X Dose X Estratégia	0,9421	0,1805	0,7932	0,115	0,5609	0,0028
CV (%)	2,17	3,43	2,78	3,24	4,01	4,58

A avaliação dos teores de boro em profundidade na estação de Rio verde mostrou que todas as fontes e estratégias de aplicação foram capazes de elevar os teores de B em diferentes camadas do perfil. A avaliação do perfil mostrou que, independentemente da estratégia, o acréscimo médio de B no solo foi de 0,10ppm (Figura 28a). A aplicação de doses anuais (Figura 28b) de B gerou um acréscimo de tores no solo na camada de 0-20cm de 0,13ppm do elemento. Para as doses trienais (Figura 28c) esse aumento foi de 0,06ppm.

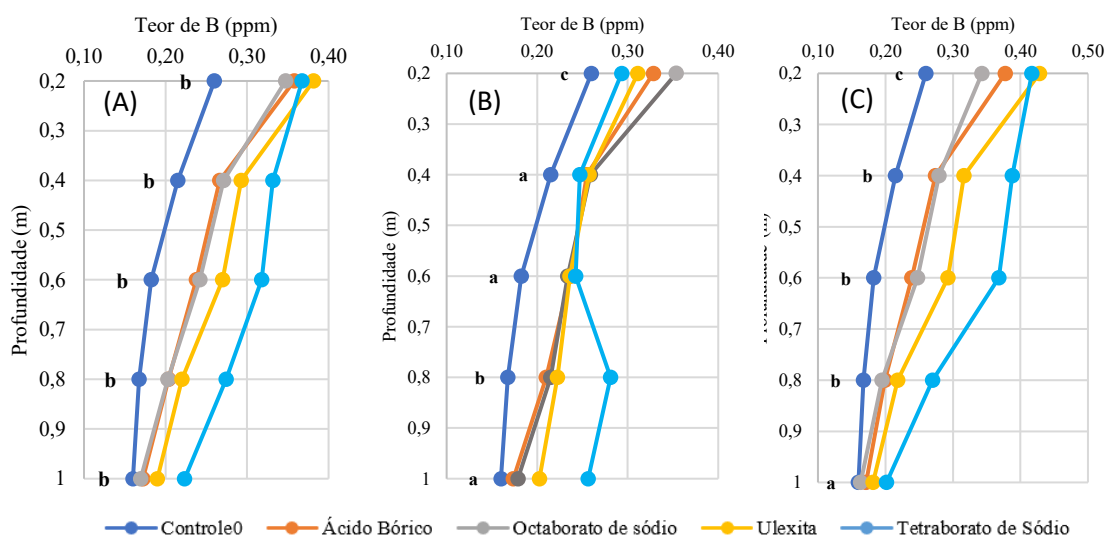


Figura 28. Teor de B (ppm) em profundidade (m) a partir da aplicação de diferentes fontes na estação de Rio Verde-GO após 6 cultivos, 3 cultivos de verão de soja e 3 cultivos de inverno de milho. (A) Teores de B em profundidade de doses anuais e trienais, (B) Teores de B em profundidade de doses anuais de B e (C) Teores de B em profundidade de doses trienais de B. Letras minúsculas correspondem a diferenças entre as fontes para a média das doses pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Ao se avaliar o percentual de elevação de B no solo na camada de 0-20 cm a partir das doses anuais de B (Figura 28a), a fonte ulexita proporcionou uma elevação média de 64,7% do teor absoluto. A fonte tetraborato de sódio foi a que apresentou a maior % de aumento em subsuperfície, com média de incremento de 62,9% nas camadas inferiores aos 40cm.

4. DISCUSSÃO

As médias de incremento de produtividade a partir da oferta de boro para a cultura da soja e milho evidenciam a necessidade do aporte do elemento em condições de produção nos solos do Cerrado (Figura 6 e 15). É sabido que os teores naturais de determinado elemento no solo, modulam o potencial de resposta do sistema ao fornecimento deste, seguindo os princípios da lei do mínimo e que esta frequência de resposta tem sua intensidade modulada principalmente pelo conjunto de processos fisiológicos que o elemento atua (Mengel e Kirkby, 1987; Kreuz et al., 1995; Cakmak e Romheld, 1997; Liu e Yang, 2000; Taiz et al., 2017).

Este incremento de produtividade era esperado devido as inúmeras funções realizadas pelo elemento em processos fundamentais do metabolismo e embora dois solos estudados apresentassem teores de B considerados altos, ou seja maiores que 0,5 ppm (Galvão, 2004), manuais de recomendação recentemente atualizados como o Boletim 100 para o estado de São Paulo, sugerem que os níveis considerados altos para culturas anuais correspondem a valores superiores a 0,6 ppm, este fato vai de encontro ao tendência de maior requerimento nutricional e responsividade dos novos matérias cultivados podendo ser adotado para justificar a resposta dos cultivos.

Os resultados de incremento produtivo em diferentes cultivares neste conjunto de experimentos corroboram com os achados de Freitas et al. (2024) que avaliando 10 cultivares de soja no estado do Mato Grosso Sul obtiveram ganhos de produtividade médios de 21,2% a partir da estratégia de fornecimento de B via Ulexita na dose de 3 kg de B ha⁻¹, além de melhoria de parâmetros fisiológicos das plantas. Outros trabalhos como o de Ross et al. (2006) também relatam acréscimos de produtividade a partir da nutrição com B na cultura da soja, em seu estudo os autores obtiveram ganhos de produtividade variando entre 4-130%, em 3 dos 4 sítios experimentais avaliados em diferentes condições nos Estados Unidos.

Em paralelo a isso, alguns estudos também avaliaram a resposta da cultura da soja a nutrição com B, tanto isoladamente como em combinação com outros elementos. Galeriani et al. (2022b) demonstraram que a nutrição adicional com Ca e B na cultura da soja trouxe incremento produtivo, além de aumento do número de vagens e grãos por planta. Rodrigues et al. (2024) também no estado do Mato Grosso do Sul, avaliaram a resposta em produtividade de sementes da cultura da soja e também a influência da nutrição com B nos parâmetros qualitativos das sementes a partir do fornecimento do elemento via ulexita e ácido bórico nas

doses de 0,1,2,4 e 8 kg ha⁻¹. Os resultados indicaram que a aplicação de B nas doses entre 3,17 e 3,36 kg ha⁻¹ aumentaram tanto a produtividade como também a qualidade das sementes colhidas, mantendo elevadas porcentagens de germinação mesmo após 6 meses de armazenamento.

A definição da dose (Figura 7) de B também é determinante para o sucesso da fertilização com o elemento. Neste trabalho foi observado que de modo geral o sistema responde a doses maiores de B, superiores aos requerimentos nutricionais do sistema soja-milho. Os resultados sugerem uma maior amplitude de resposta para solos com teores de argila maiores, representados aqui neste experimento pelas unidades de Rio verde e Cristalina. Para solos de textura média, aqui representados pela unidade de Catalão também existe uma maior amplitude de resposta do sistema a doses maiores do elemento. Em contrapartida os resultados direcionam ao entendimento de que para solos de textura arenosa o limite de dose a ser aplicada anualmente tende a ser inferior

A dose para o máximo rendimento variou de acordo com os agrupamentos texturais (Tabela 11), esperava-se que o potencial de resposta a doses de B fosse menor no solo de textura arenosa, devido principalmente a fatores relacionados a disponibilidade imediata do nutriente neste solo. Por outro lado, com o aumento dos teores de argila o potencial de trabalho com doses maiores de boro é possível, fato este que ficou evidente na maior dose de B para o máximo rendimento no agrupamento de textura argilosa. Dessa forma os resultados sugerem que as doses de boro devem ser aplicadas sempre com o entendimento da variação textural da área.

Diversos trabalhos avaliaram a interação de parâmetros de solo com a dinâmica e teor do B na solução do solo. Deste modo os solos com maior capacidade tampão, maiores teores de matéria orgânica e argila, dispõem de características que permitem maiores doses do elemento sem prejuízo a produção. Na estação de Jaborandi o solo apresenta o menor teor de argila e é aquele com o menor teor de matéria orgânica, característica esta que tem impacto direto nos processos de adsorção do elemento e pode explicar o padrão de resposta as doses do elemento (Soares et al., 2008 ; Azevedo et al., 2001).

Outros autores também estudaram as respostas da cultura da soja a doses crescentes do elemento e assim como Rodrigues et al. (2024) e Dameto, (2023) observaram reduções de produção com doses elevadas do elemento. Campos et al. (2021) avaliando respostas da cultura da soja na região de Ipameri-GO com doses de B variando entre 1 a 5 kg de B ha⁻¹ observaram que para a condição do solo estudada, 1,53% de MOS e 27% de argila, a dose de máxima

resposta foi de 3,27 kg ha⁻¹ de B resultados estes que vão de encontro aos de Gomes et al. (2017).

Os decréscimos de produtividade observados, principalmente na condição de solo arenoso sugerem fitotoxidez pelo elemento. Os sintomas de toxidez são variáveis entre as espécies devido a mobilidade do elemento no floema variar entre espécies. Em geral os sintomas incluem clorose e posterior necrose dos tecidos do limbo foliar, localizadas principalmente nas bordas do tecido. Os impactos negativos podem variar de atraso na emergência das plantas, redução de porte das plantas, redução do peso seco da planta e também do peso de mil grãos (Nable, 1988; Paull, et al., 1988; Rehman, et al., 2006 e Mahlakshimi, et al., 1995)

O rendimento médio dos cultivos nos anos estudados foi afetado pela fonte de boro aplicada. Dentre as fontes avaliadas o octaborato de sódio foi superior as outras fontes quando comparadas as produtividades médias dos 13 cultivos de soja. Este resultado pode ter uma alta relação com a dinâmica de liberação do elemento no solo pelas diferentes fontes. Nos estádios iniciais do ciclo, o processo de enraizamento tem como fonte inicial de energia os carboidratos e componentes dos cotilédones, com o desenvolvimento dos novos tecidos foliares e expansão da área foliar é necessário que a planta direcione grande parte dos fotoassimilados para construção das raízes com o objetivo principal de aumento de absorção de água e nutrientes (Taiz et al., 2017).

Embora o ácido bórico (H₃BO₃⁰) também seja uma fonte solúvel de rápida liberação, na média dos resultados das doses anuais na cultura da soja, os resultados mostraram uma diferença de 2,79 sc ha⁻¹ quando comparado ao octaborato de sódio que também é uma fonte solúvel. É evidente que a oferta do elemento por ambas as fontes foi capaz aumentar a produtividade quando comparado ao controle e isto levanta a hipótese de que essa diferença entre fontes de naturezas químicas semelhantes pode ter relação com a própria dinâmica do elemento no solo, uma vez que a forma de borato H₄BO₄⁻ é adsorvida ao solo com maior intensidade (Goldberg et al., 1993).

Neste sentido a fonte octaborato de sódio mostrou-se superior a fonte ulexita (p<0,05) e numericamente superior a fonte tetraborato de sódio. Tanto o tetraborato de sódio quanto a ulexita apresentam dinâmicas de liberação com velocidades inferiores ao octaborato de sódio, processo inerente a própria estrutura e composição química de cada fonte. A partir disto, processos fisiológicos que estejam situados no início do desenvolvimento das plantas, como o

enraizamento seriam beneficiados por esta rápida liberação do elemento pela fonte octaborato de sódio. Os resultados de incremento de massa seca de raízes mostraram ganhos de 17,5 e 52,5% quando comprado a ulexita e tetraborato, respectivamente (Figura 18).

Além das funções relacionadas diretamente ao crescimento radicular como formação da parede celular e estabilização de membranas o boro atua em processos relacionados a mitigação do estresse causado pelo alumínio. Este fato é importante pois na estação de Catalão, pois a análise de solo evidenciava baixos teores de cálcio em subsuperfície, além de baixa saturação de bases. Nestas condições químicas, ainda é possível que a produtividade seja afetada negativamente antes da completa reação do calcário aplicado. Deste modo, é possível associar os resultados de incremento radicular mesmo em condições químicas não adequadas a esta função do elemento (Riaz et al., 2018).

Baseado nisto a aplicação em pré-plantio da fonte solúvel seria capaz de fornecer um ambiente de enraizamento com teores adequados do elemento e isto, atrelado a ação do boro na formação de novas estruturas, favoreceria o crescimento radicular inicial melhorando não só a nutrição da planta e a acessibilidade a água como também a possibilidade de aumento de qualidade e quantidade de nódulos por planta (Yamagishi e Yamamoto, 1994). Esse elemento é particularmente necessário para o direcionamento de glicoproteínas específicas da nodulação, que desempenham papel crucial como sinais na diferenciação dos bacteroides para a sua formação na fixação de nitrogênio (Redondo-Nieto et al., 2001).

O boro desempenha um papel fundamental na sinalização inicial entre a planta hospedeira e os simbiossomas, sendo essencial para a ativação dos genes *nod* por exsudatos radiculares e a iniciação da nodulação. Além disso, é indispensável para o desenvolvimento do fio de infecção e a invasão dos nódulos, atuando como modulador das interações entre as glicoproteínas da matriz do fio de infecção e a superfície celular das bactérias (Redondo-Nieto et al., 2001). Na ausência de boro, essas glicoproteínas podem se ligar à superfície das células bacterianas, impedindo a interação com a membrana plasmática da planta e inibindo a endocitose necessária para a invasão celular (Bolaños et al., 1996). A presença de boro, por outro lado, inibe especificamente essa ligação *in vitro* e favorece a interação da bactéria com a membrana da planta antes da invasão celular. Uma vez que o *Rhizobium* se estabelece dentro da célula, o boro promove o desenvolvimento do simbiossomo, estrutura que abriga os bacteroides fixadores de N₂ (Bolaños et al., 2001).

Na estação de Rio Verde (Figura 9) ao longo dos anos experimentais a fonte com maior rendimento médio variou. No primeiro e quarto ano a fonte com maior rendimento foi o octaborato de sódio, no segundo e terceiro ano a ulexita, e no quinto ano a fonte de maior rendimento foi o tetraborato de sódio. Essa condição de variação no potencial de resposta a cada fonte pode ter relação com a dinâmica de liberação do elemento por cada fonte, e com o regime de chuvas do e ano avaliado, sendo que a dinâmica de liberação gradual garantiria uma maior segurança na disponibilidade do elemento no solo. Na média geral dos anos o octaborato de sódio se destacou com maior rendimento médio sendo superior a ulexita e ácido bórico e semelhante estatisticamente ao tetraborato de sódio. A maior produtividade pode ter relação direta com o processo de enraizamento e todos os parâmetros eu ele afeta.

Em Catalão na média dos 3 cultivos avaliados observa-se uma superioridade das fontes em relação ao ácido bórico. Esta superioridade pode ter relação com a dinâmica de lixiviação do elemento no solo. Embora a oferta na sua forma molecular de ácido bórico possa conferir uma maior facilidade de absorção, a mesma forma não apresenta interação com os colóides do solo nas condições de pH estudadas, podendo justificar uma menor eficiência da fonte.

No solo de textura arenosa, na média dos anos avaliados, não se observou diferenças estatísticas entre as fontes. Embora sem diferença estatística, a diferença entra a fonte com maior rendimento e a com menor rendimento foi de 1,3 sc ha l^{-1} . A maior propensão as perdas por lixiviação neste tipo de sistema, pode conferir menor eficiência para todas as fontes, em especial as solúveis. Deste modo os resultados sugerem uma diferença entre as fontes que deve ser mais bem estudada. Em Cristalina, observam -se ligeiras diferenças entre as fontes com boro na forma de borato, a maior capacidade desta forma com os colóides do solo para conferir a estas fontes uma maior persistência nos solos e melhor nutrição global, com isto estudos que avaliem a dinâmica de lixiviação de cada uma das fontes devem ser feitos para compreensão do fenômeno.

O ajuste de curvas de resposta (Figura 13) em modelagem polinomial permite o entendimento do padrão de resposta para cada fonte (Lopes, 1998). Tanto o octaborato de sódio como a ulexita apresentam elevados coeficientes lineares que evidenciam o rápido aumento de produtividade até o vértice das parábolas, além também de um estreitamento da abertura das curvas, com destaque para o maior estreitamento da fonte ulexita. Comparativamente as fontes ulexita e octaborato de sódio, o tetraborato de sódio apresenta uma maior abertura da curva e menor coeficiente linear na equação ajustada para as doses anuais.

A partir das derivadas de cada uma das equações apresentadas (Figura 13), pode-se obter valores de kg de B ha⁻¹ para o máximo rendimento iguais a 1,67, 1,39, 1,44 e 1,29 kg de B para ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita, respectivamente. O octaborato dentre as fontes foi aquela que atingiu a maior produtividade projetada seguido pelo tetraborato e ulexita. A ulexita foi a fonte que obteve o ponto de máximo rendimento com a menor dose aplicada, porém se mantendo inferior ao octaborato de sódio.

Além da avaliação de cada fonte na média dos experimentos foram conduzidas avaliações contrastando as diferentes condições texturais (Figura 14). Na média dos locais, nas estações de textura argilosa (Rio Verde e Cristalina) e na estação de textura média (Catalão) o ácido bórico foi inferior as outras fontes, com destaque para a dose de 1 kg de B ha⁻¹. Já na condição de textura arenosa, as fontes tiveram comportamento similar. É possível observar uma redução da amplitude de resposta entre o octaborato, o tetraborato e a ulexita frente ao ácido bórico, representada pela diminuição das áreas entre o grupo de curva das fontes octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita e o ácido bórico (Figura 14b e 14c).

A nutrição com B afetou positivamente a produtividade do milho cultivado em sequência a cultura da soja na unidade de Rio Verde-GO, mesmo em condição de efeito residual. Os resultados obtidos em relação ao incremento de crescimento radicular na cultura da soja indicam que este mecanismo também pode ser relacionado aos maiores rendimentos na cultura do milho. O incremento de crescimento radicular principalmente na condição climática de cultivo da safra de inverno, menor precipitação e presença de períodos de estiagem, deve ser o fator predominante para o ganho de potencial produtivo (EMBRAPA, 2012).

Wilder et al. (2022) investigaram as respostas do milho a diferentes níveis de boro, aplicado na forma de ácido bórico, por meio de radiotraçadores (¹¹C) e ICP-MS. A marcação com ¹¹C permitiu quantificar alterações na fixação de CO₂, transporte de fotoassimilados e alocação de carbono para as raízes, correlacionando esses processos com o crescimento da planta e a interação se torna a principal hipótese para o aumento de produtividade da cultura do milho.

Yar, (2021) destaca em seu estudo avaliando as respostas da cultura do milho a aplicação foliares, no sulco de plantio e a lanço do elemento, a melhoria de parâmetros de crescimento da cultura do milho como altura de plantas, número de grãos por espiga, área foliar além de incrementos de produtividade a partir da fonte ácido bórico. Nos resultados dos 5 cultivos de

milho, o ácido bórico incrementou 20,6 sc ha⁻¹ em relação ao controle ficando com a menor média de incremento entre as fontes.

Para as curvas de respostas das fontes isoladas na cultura do milho ácido bórico apresentou o menor coeficiente linear (1544,2) e quadrático mais ameno (-429,51), indicando uma resposta inicial mais gradual à adubação com boro e menor efeito depressivo em doses elevadas (Figura 17). O octaborato de Sódio, com maior coeficiente linear (2487,7) e quadrático mais negativo (-726,41), promoveu um aumento inicial mais expressivo na produtividade, mas com estabilização mais precoce. O tetraborato de Sódio teve coeficiente linear semelhante ao Octaborato (2492,5) e quadrático mais negativo (-895,39), sugerindo uma resposta rápida com ponto de máxima atingido precocemente. Já a ulexita, com o coeficiente quadrático mais negativo (-909,79) e linear alto (2472,1), apresentou tendência similar ao Tetraborato, mas com maior redução da produtividade em doses mais elevadas.

Os resultados relativos a interação da nutrição com boro e os teores foliares de outros elementos mostraram correlação positivas que em muitos casos estão associadas ao aumento de volume radicular, favorecimento do processo de difusão, e também pela melhoria da atividade de membranas como observado nos trabalhos de Long e Peng, (2023). O maior crescimento radicular tem influência direta no status nutricional da lavoura modulando a absorção de todos os elementos disponíveis no solo. Os resultados mostraram correlação dos teores foliares de boro com outros elementos como Zn, Mn, Fe, P, Ca, K, Mg e S (Reeve e Shive, 1944; Lopez e Rivero, 2002; Bonilla e Bolaños, 2004; Tariq e Mott, 2007; Galeriani et al., 2022).

Do ponto de vista da interação e no processo de absorção e transporte na planta as pesquisas ainda são escassas sobre a interação BxP e BxK, no entanto do ponto de vista do processo de absorção dos elementos do solo e levando em consideração os resultados aqui apresentados, é possível correlacionar o aumento dos teores de P e K nas folhas a partir do incremento do crescimento das raízes. Além dos processos intrínsecos aos mecanismos de absorção e aumento de volume radicular, alguns trabalhos demonstram que plantas bem nutridas com B apresentam menores taxas de perda por exsudação do K no tecido foliar (Ceylan e Cakmak, 2017). As interações de BxCa são relatadas principalmente no que tange a ação dos dois elementos nos processos fisiológicos relacionados a síntese da parede celular, alguns trabalhos evidenciam que em condições de teores elevados de Ca no solo pode existir a formação de complexos de boratos de cálcio que reduzem a absorção do boro pelas plantas Long e Peng, (2023).

Além da interação entre o crescimento radicular e a absorção de potássio, elemento essencial no processo de transporte de fotoassimilados na planta, a nutrição com boro é capaz de aumentar o transporte de açúcares na planta através de fatores diretos e indiretos. De forma direta, a formação do complexo borato-açúcar ionizável permite um aumento da eficiência de transporte dos açúcares entre as membranas e que por fim podem ser alocados nas sementes e grãos aumentando o seu PMG (Pommerrenig; Eggert; Bienert, 2019; Shireen et al., 2018) e indiretamente a melhor estrutura dos vasos condutores permite um transporte mais eficiente dos fotossimilados. Os resultados mostraram aumentos de PMG na estação de Catalão que variaram entre 2,81 e 5,21%. Dentre os parâmetros de produção o peso de mil grãos é de fundamental importância para que se obtenham boas produtividades. Na estação de Jaborandi o incremento médio de PMG a partir das doses anuais de boro foi de 3,27%. A fonte que apresentou o maior ganho de PMG relativo ao controle foi o tetraborato de sódio. Estes resultados de incremento de peso de mil grãos também foram observados por Rabaoli et al. (2021) em seu estudo avaliando duas fontes de boro, tetraborato e ácido bórico na cultura soja onde o ácido bórico apresentou ganhos superiores ao do tetraborato de sódio.

A intensidade de resposta a reaplicação anual de boro parece ter relação estreita com a textura do solo avaliada. Ao longo de cada ciclo de reaplicação foi possível observar a influência de cada dose no rendimento anual da cultura da soja. Para todas as estações o incremento da aplicação anual de boro foi superior a 4 sc ha⁻¹ evidenciando a importância desta estratégia de manejo da nutrição com boro.

Na estação de Rio Verde é possível observar que no ciclo de doses trienais, a aplicação anual no segundo ano (acumulado de B = 4 kg ha⁻¹) obteve rendimento igual a aplicação de 6 kg de B ha⁻¹ da estratégia trienal (Figura 24b). Essa observação leva a ideia de que mesmo um acumulado de maior dose aplicado ao sistema, dependendo dos fatores relacionados a lixiviação, pode-se obter rendimento equivalente a doses inferiores aplicadas anualmente. E já no terceiro ano de cultivo, igualando-se as doses acumuladas, os rendimentos das doses anuais são superiores,

Para a estação de Catalão, observa-se superioridade da estratégia de aplicação trienal no primeiro ano (Figura 24a), já que a dose aplicada é superior (3 e 6 kg ha⁻¹), no entanto a aplicação anual se mostra superior nos anos subsequentes. Os resultados aqui demonstrados sugerem que a dose total anual do sistema supera o requerimento nutricional, sendo assim em um evento de aplicação com dose elevada (Ano 1 da dose trienal), todos os benefícios da

nutrição com boro sejam maximizados e isso pode vir a justificar o maior rendimento no primeiro ano. No segundo ano ainda é possível notar que a estratégia de fornecimento anual, mesmo com um acumulado menor da dose aplicada, acaba sendo superior a estratégia trienal.

Na estação de Jaborandi, a estratégia anual de fornecimento de boro é superior as combinações de estratégias de aplicação esparsadas. Os resultados (Figura 25a e 26a) sugerem que as aplicações de doses superiores ao fracionamento anual, tendem a ser fitotóxicas (Gupta et al., 1985). Este efeito de perda de produtividade fica evidente nos dois primeiros anos do ciclo de aplicações trienais e no primeiro ano do ciclo de aplicação bienais.

Os resultados compilados a partir dos anos subsequentes a aplicação da dose total no sistema (Figura 28) demonstram uma larga amplitude de resposta, principalmente nas condições de menores teores de argila, Catalão e Jaborandi. Este fato pode ter estreita relação com a dinâmica do boro no solo, como já citado o fator textura tem relação direta com os processos de adsorção do elemento e isso tem impacto direto no efeito residual do boro no solo (Sá e Ernani, 2016).

A elevação dos teores de boro nos solos do Cerrado tende a ser complexa pois nas condições químicas dos solos agrícolas cultivados e atrelado as altas precipitações, as perdas por lixiviação tendem a superar o saldo existente após a exportação das culturas. Além disso, em condições de clima tropical a rápida mineralização da matéria orgânica, principalmente em áreas de plantio convencional, não permite o aumento dos teores de matéria orgânica do solo, dificultando ainda mais os processos de adsorção do boro. Os resultados aqui obtidos trazem uma nova ótica sobre o manejo de boro no sistema e uma possível estratégia para correção dos teores de boro no solo. A avaliação em perfil do incremento de B a partir das doses anuais para as 4 fontes mostrou que para as doses anuais o incremento médio chegou a 39,57%, sendo superior a estratégia de aplicação trienal com 27,51%. (Delazare et al., 2014; Goldberg, 1997; Keren e Bingham, 1985)

Os resultados obtidos em Rio Verde demonstram que se a dose aplicada for superior a própria exportação, este balanço positivo ao longo dos anos tende a ser manter e os teores se elevariam. Os incrementos do boro no solo até profundidades de 1 m mostram o potencial das perdas por lixiviação, mesmo com aplicações de doses menores e recorrentes (anuais). Avaliando-se os resultados de aplicações anuais de boro, a ulexita foi a fonte que obteve o maior incremento relativo ao controle na camada de 0-20 cm. Ao final dos cultivos do sistema soja-milho o teor de B na camada de 0-20 cm nas parcelas sem aplicação de B era de 0,26 ppm, vale

ressaltar que a diferença entre o teor inicial de 0,16 ppm se deve principalmente a ciclagem do elemento de camadas mais profundas, e já para a ulexita este valor chegou a 0,43 ppm, cerca de 65% de aumento ($p < 0,05$). A hipótese inicial era de que os boratos de cálcio apresentassem maior potencial de elevação dos teores no solo devido aos processos de liberação do elemento serem mais lentos para boratos naturais, quando comparadas ao tetraborato e as fontes solúveis pois apresentam menor dissociação iônica em meio aquoso devido a formação de redes cristalinas na sua estrutura, presença de ligações fortes de Ca-B e por fim formação de hidratos estáveis na sua estrutura (Mortvedt, 1994; Byers et al., 2001).

Os resultados expostos sugerem então uma alta responsividade a nutrição com boro tanto para a cultura da soja como também para a cultura do milho cultivado em sequência. Além disto, as doses ótimas de boro para o máximo potencial produtivo se mostraram superiores aos requerimentos nutricionais do sistema. Atrelado a esta maior responsividade do sistema a doses de B, as 4 fontes avaliadas (ácido bórico, octaborato de sódio, tetraborato de sódio e ulexita) mostraram que as suas características químicas interferem na sua capacidade de fornecimento do elemento e de aumento de produtividade das culturas. Além do efeito direto na produtividade dos cultivos os resultados mostraram os potenciais de melhoria dos parâmetros de crescimento e o efeito da nutrição com boro no estado nutricional geral da planta. Novos estudos serão necessários para a investigação da intensidade da ação do elemento em cada processo e para seleção outras estratégias de manejo que possam ser agregadas, além do entendimento da dinâmica de liberação do elemento e potencial de lixiviação/adsorção a partir das diferentes fontes. Quanto ao intervalo de reaplicação do elemento, os resultados corroboram com a percepção de que, devido aos fatores ligados a perdas por lixiviação do elemento serem dominantes no sistema, a aplicação anual vem a ser a melhor estratégia de fornecimento para os cultivos.

Adicionalmente aos resultados deste trabalho, para que o fenômeno da dinâmica do boro seja compreendido em sua totalidade no sistema soja-milho, outros fatores, como a utilização de calcário e combinação de fontes de boro. Diversos trabalhos já identificaram quais componentes do solo interagem com a capacidade de retenção de B no sistema. Resultados de Alleoni e Camargo, (2000), Evans e Sparks, (1983), Hatcher et al. (1967) e Steiner e Lana, (2013) corroboram com a ideia de que para que se obtenham um real aumento dos teores de boro no solo dois aspectos devem ser trabalhados, doses superiores aos requerimentos nutricionais e estratégias complementares de elevação do pH e dos teores de matéria orgânica.

5. CONCLUSÕES

1. A nutrição com boro foi capaz de elevar a produtividade da cultura da soja e do milho nas condições avaliadas.
2. A dose ótima de boro variou entre as estações seguindo o gradiente textura explorado, sendo que a dose ótima é menor em solos de textura arenosa quando comparada a solos de textura média e argilosa. Para todos os cenários estudados as doses para o máximo rendimento foram superiores ao requerimento nutricional das culturas.
3. As diferentes fontes tiveram comportamentos singulares tanto nas doses anuais como também nos intervalos de aplicação, sendo o ácido bórico inferior as demais e o octaborato de sódio superior as demais na grande maioria dos cultivos. O índice de eficiência para cada fonte variou com a textura do solo.
4. A nutrição com boro foi capaz de modular parâmetros produtivos da cultura da soja. A partir de melhoria do status nutricional das plantas e maior desenvolvimento radicular.
5. Sugere-se que a aplicação anual de boro vem a ser a melhor estratégia para se obter maiores rendimentos e a manutenção do B no sistema no longo prazo. Para todas as estações, no acumulado geral dos experimentos a estratégia de aplicação anual foi superior.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. BORON ADSORPTION IN SOILS FROM THE STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL. **Pesquisa agropec. brasileira**, v. 35, n. 2, p. 413–421, 2000.

AZEVEDO, W. R.; FAQUIN, V.; FERNANDES, L. A. Adsorção de boro em solos de várzea do Sul de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 7, 2001.

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

BOLAÑOS, L.; CEBRIÁN, A.; REDONDO-NIETO, M.; RIVILLA, R.; BONILLA, I. Lectin-like glycoprotein PsNLEC-1 is not correctly glycosylated and targeted in boron-deficient pea nodules. **Molecular Plant-Microbe Interactions**, v. 14, p. 663–670, 2001.

BONILLA, I.; EL-HAMDAOUI, A.; BOLAÑOS, L. Boron and calcium increase *Pisum sativum* seed germination and seedling development under salt stress. **Plant Soil**, 267, 97–107.],2004.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Milho: relações internacionais. Brasília, DF: MAPA. Acesso em: 5 mar. 2025.

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

CAKMAK, I.; RÖMHELD, V. Boron deficiency-induced impairments of cellular functions in plants. **Plant and Soil**, v. 193, n. 1-2, p. 71-83, 1997.

CAMPOS, T. S.; SOUZA, A.G.V; FARIA, O.L.; CINTRA, P.H.N.; MELO, O.F.P.; RODRIGUES, D.B.; BENETT, C.G.S.; BENETT, K.S.S.; TUNES, L.V.M.; MIGUEL,P. et al. Productivity, quality and composition of soybean seeds in storage as a function of boron doses at different phenological stages **Revista de Ciências Agrárias**, v. n. 1, p. 68–81, 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Boletim de acompanhamento da safra de grãos. Brasília, DF: CONAB. ISSN 2318-6852. Acesso em: 5 mar. 2025.

DA SILVA GOMES, I.; LOPES, R. C.; FERREIRA, M. L.; SILVA, R. R.; NASCIMENTO, J. A. Boron fertilisation at different phenological stages of soybean. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 8, p. 1026–1032, 2017.

DAMETO, L. S.; MORAES, L. A. C.; MOREIRA, A. Effects of boron sources and rates on grain yield, yield components, nutritional status, and changes in the soil chemical attributes of soybean. **Journal of Plant Nutrition**, v. 46, n. 9, p. 2077–2088, 2023.

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

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

DELAZARE, T.; FERREIRA, LP.; RIBEIRO, N.F.P.; SOUZA, M. M.V.M.; CAMPOS, J.C.; YOKOYAMA, L. Removal of boron from oilfield wastewater via adsorption with synthetic layered double hydroxides. **Journal of Environmental Science and Health - Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering**, v. 49, n. 8, p. 923–932, 2014.

Efeitos do estresse hídrico na produção de grãos e na fisiologia da planta de milho. **EMBRAPA**, 2012.

FREITAS, I. L.; TEIXEIRA, G. C.; CAMPOS, C. N. S.. TEODORO, L. P. R.; RODRIGUES, D. M.; ALVARES, R. C. F.; PRADO, R. M.; TEODORO, P. E. Impact of boron fertilisation on soybean grain yield as affected by associated physiological factors. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, 2024.

GALERIANI, T. M.; NEVES, G. O.; FERREIRA, J. H. S.; OLIVEIRA, R. N.; OLIVEIRA, S. L.; CALONEGO, J. C.; CRUSCIOL, C. A. C. Calcium and boron fertilization improves soybean photosynthetic efficiency and grain yield. **Plants**, v. 11, n. 21, 1 nov. 2022.

GALRÃO, E.Z. Micronutrientes. In: SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. (Ed.). Cerrado: correção do solo e adubação. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p.185-226.

GOLDBERG, S. Reactions of boron with soils. **Plant and Soil**. Kluwer Academic Publishers, 1997.

GOLDBERG, S.; FORSTER, H. S.; HEICK, E. L. Boron adsorption mechanisms on oxides, clay minerals, and soils inferred from ionic strength effects. **Plant and Soil**, [s.l.: s.n.].

GOMES, I. D. S.; BENETT, C.G.S.; JUNIOR, R.L.; XAVIER, R.C.; NEBETT, K.S.S.; SILVA, A.R.; CONEGLIAN, A.. Boron fertilisation at different phenological stages of soybean. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 8, p. 1026–1032, 2017.

KEREN, R.; BINGHAM, F. T. Boron in water, soils, and plants. *Advances in Soil Science*. New York, NY: **Springer Verlag Inc.**, v. 1, p. 229–276, 1985.

KREUZ, C.; LANZER, E.; PARIS, Q. Funções de Produção Liebieg. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 1, p. 95–106, jan. 1995.

LIU, P.; YANG, Y. Effects of molybdenum and boron on membrane lipid peroxidation and endogenous protective systems of soybean leaves. **Acta Botanica Sinica**, v. 42, n. 5, p. 461–466, 2000.

LONG, Y.; PENG, J. Interaction between boron and other elements in plants. **Genes** (NLM - Medline), 3 jan. 2023.

LOPES, A. S. Manual Internacional de Fertilidade do Solo. 2. ed. Piracicaba: **Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo**, 1998.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Boletim Técnico nº 5: Solos sob Cerrado - Manejo da Fertilidade para a Produção Agropecuária. **Associação Nacional para Difusão de Adubos** (ANDA), 2008.

LOPEZ-LEFEBRE, L.R.; RIVERO, R.M.; GARCIA, P.C.; SÁNCHEZ, E.; RUIZ, J.M.; ROMERO, L. Boron effect on mineral nutrients of tobacco. **J. Plant Nutr.**, 25, 509–522, 2002.

MAHALAKSHMI, V.; YAU, S.K.; RYAN, J.; PEACOCK, J.M. Boron toxicity in barley (*Hordeum vulgare* L.) seedlings in relation to soil temperature. **Plant Soil**, 177, 151–156, 1995.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. Principles of Plant Nutrition. 4. ed. **International Potash Institute**, Worblaufen-Bern, Switzerland, 1987.

MORTVEDT, J. J. Needs for controlled-availability micronutrient fertilizers. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 38, p. 213-221, 1994.

NABLE, R.O. Resistance to boron toxicity amongst several barley and wheat cultivars: A preliminary examination of the resistance mechanism. **Plant Soil**, 112, 45-52, 1988.

NOGUEIRA-DE-ALMEIDA, C. A.; FERRAZ, I. S.; UED, F. V.; ALMEIDA, A. C. F.; DEL CIAMPO, L. A. Impact of soy consumption on human health: integrative review. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 23, e2019129. 2020.

PAULL, J.G.; CARTWRIGHT, B.; RATHJEN, A.J. Responses of wheat and barley genotypes to toxic concentrations of soil boron. **Euphytica**, 39, 137–144, 1988.

POMMERENIG, B.; EGGERT, K.; BIENERT, G. P. Boron deficiency effects on sugar, ionome, and phytohormone profiles of vascular and non-vascular leaf tissues of common plantain (*Plantago major* L.). **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 16, 2 ago. 2019.

RABAIOLI, F. D.; MENEGHEL, B. P. C.; ROHDE, E. H.; RICHART, A. Fontes e doses de boro aplicadas em pré-semeadura da soja sobre os componentes de rendimento. **Journal of Agronomic Sciences** (Umuarama), v. 10, n. 1, p. 109–123, 2021.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, SP: Instituto Agrônomo, 2001.

REDONDO-NIETO, M.; RIVILLA, R.; EL-HAMDAOUI, A.; BONILLA, I.; BOLAÑOS, L. Boron deficiency affects early infection events in the pea-Rhizobium symbiotic interaction. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 28, p. 819–823, 2001.

REEVE, E.; SHIVE, J. W. Potassium–boron and calcium–boron relationships in plant nutrition. **Soil Science**, v. 57, p. 1–14, 1944.

REEVE, E.; SHIVE, J.W. Potassium-boron and calcium-boron relationships in plant nutrition. **Soil Science**, 57, 1–14, 1944.

REGUERA, M.; GOMEZ, J. M.; RUIZ, A. M.; PEREZ, C. S. Carbon-11 radiotracing reveals physiological and metabolic responses of maize grown under different regimes of boron treatment. **Plants**, 2022.

REHMAN, S.; PARK, T.I.; KIM, Y.J.; SEO, Z.W.; YUN, S.J. Inverse relationship between boron toxicity tolerance and boron contents of barley seed and root. *J. Plant Nutr*, 29, 1779–1789, 2006.

RIAZ, M.; YAN, L.; WU, X.; HUSSAIN, S.; AZIZ, O.; WANG, Y.; IMRAN, M.; JIANG, C. Boron alleviates the aluminum toxicity in trifoliate orange by regulating antioxidant defense system and reducing root cell injury. *Journal of Environmental Management*, v. 208, p. 149–158, 15 fev. 2018.

RODRIGUES, D. M.; CAMPOS, C. N. S.; SOUZA JUNIOR, J. P.; ALVES, C. Z.; CÂNDIDO, A. C. S.; TEODORO, L. P. R.; TEODORO, P. E.; CORADI, P. C.; DAVID, C. H. O.; PRADO, R. M. Boron nutrition increases soybean seed yield and maintains the quality of germination in storage seeds. *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 46, n. 7, 1 jul. 2024.

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

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*, MDPI AG, , 1 jul. 2018.

SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C.; ALLEONI, L. R. F. Adsorção de Boro em Solos Ácricos em Função da Variação do pH. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 3, p. 1113-1122, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. 6. ed. Porto Alegre – RS: **Editora Artemed**, 2017.

TARIQ, M.; MOTT, C.J.B. Effect of applied calcium-boron ratio on the availability of each to radish (*Raphanus sativus* L.). *Sarhad J. Agric*, 23, 357, 2007.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Brazil: oilseeds and products update. Washington, DC: USDA. Acesso em: 5 mar. 2025.

WILDER, S. L.; SCOTT, S.; WALLER, S.; POWELL, A.; BENOIT, M.; GUTHRIE, J. M.; SCHUELLER, M. J.; AWALE, P.; MCSTEEN, P.; MATTHES, M. S. Carbon-11 radiotracing

reveals physiological and metabolic responses of maize grown under different regimes of boron treatment. **Plants**, v. 11, p. 241, 2022.

YAMAGISHI, M.; YAMAMOTO, Y. Effects of boron on nodule development and symbiotic nitrogen fixation in soybean plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 40, n. 2, p. 265–274, 1994.

YAR, A. Boron in maize. **Journal of Environmental and Agricultural Sciences**, v. 23, n. 1&2, p. 36–43, 2021.