



INSTITUTO FEDERAL

Goiano

Campus Rio Verde

BACHARELADO EM AGRONOMIA

DESEMPENHO AGRONÔMICO DO MILHO SUBMETIDO A DIFERENTES DOSES DE BORO E NÍVEIS DE REPOSIÇÃO HÍDRICA

LUCIANA CORRÊA DA SILVA

**Rio Verde, GO
2026**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE**

BACHARELADO EM AGRONOMIA

**DESEMPENHO AGRONÔMICO DO MILHO SUBMETIDO A
DIFERENTES DOSES DE BORO E NÍVEIS DE REPOSIÇÃO HÍDRICA**

LUCIANA CORRÊA DA SILVA

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Wilker Alves Moraes

Rio Verde – GO

Agosto, 2026

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese (doutorado) | ☐ Artigo científico |
| ☐ Dissertação (mestrado) | ☐ Capítulo de livro |
| ☐ Monografia (especialização) | ☐ Livro |
| ☒ TCC (graduação) | ☐ Trabalho apresentado em evento |

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Luciana Corrêa da Silva

Matrícula:

2021202200240284

Título do trabalho:

Desempenho agrônomo do milho submetido a diferentes doses de boro e níveis de reposição hídrica

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 10 / 10 / 2026

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☒ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.



Documento assinado digitalmente
LUCIANA CORREA DA SILVA
Data: 10/09/2026 20:59:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Verde-GO

Local

10 / 09 / 2026

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:



Documento assinado digitalmente
WILKER ALVES MORAIS
Data: 10/09/2026 21:02:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 7/2026 - CCBEAMB-RV/GGRAD-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 27 dias do mês de agosto de 2026, às 14:00 horas e 30 minutos, presencialmente no miniauditório do Bloco da Diretoria de Pós-Graduação, Pesquisa e Inovação (DPGPI), reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: Wilker Alves Moraes (orientador), Marconi Batista Teixeira (membro) e Luiz Antonio Mota (membro), para examinar o Trabalho de Curso intitulado "**Desempenho agrônômico do milho submetido a diferentes doses de boro e níveis de reposição hídrica**" da estudante **Luciana Corrêa da Silva**, matrícula nº 2021202200240284 do Curso de Bacharelado em Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, houve arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** da estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)

Wilker Alves Moraes
Orientador

(Assinado Eletronicamente)

Marconi Batista Teixeira
Membro

(Assinado Eletronicamente)

Luiz Antonio Mota
Membro

Observação:

() O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Wilker Alves Moraes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 27/08/2026 21:04:49.
- **Luiz Antonio Mota, 2024202310140003 - Discente**, em 27/08/2026 21:34:35.
- **Marconi Batista Teixeira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 28/08/2026 11:25:46.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 27/08/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 853279

Código de Autenticação: bfa545bf86



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

S586 Silva, Luciana Côrrea da
Desempenho agrônômico do milho submetido a diferentes doses de boro e níveis de reposição hídrica / Luciana Côrrea da Silva. Rio Verde 2026.
35f. il.
Orientador: Prof. Dr. Wilker Alves Moraes.
Monografia (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220024 - Bacharelado em Agronomia - Integral - Rio Verde (Campus Rio Verde).
1. Zea mays L.. 2. Micronutriente. 3. Manejo da irrigação. 4. Crescimento vegetal. I. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, força, sabedoria e perseverança para superar os desafios encontrados ao longo desta caminhada acadêmica.

A minha mãe e familiares, por todo amor, apoio, incentivo e compreensão durante os momentos de dedicação aos estudos, sendo fundamentais para a concretização deste sonho.

Ao meu esposo, pelo companheirismo, apoio incondicional, paciência e incentivo constante ao longo desta jornada. Obrigada por acreditar em mim, compreender os momentos de ausência e estar ao meu lado nos desafios e conquistas, contribuindo de forma essencial para a realização deste objetivo.

Ao meu orientador, pela orientação, paciência, disponibilidade e pelos valiosos ensinamentos compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo significativamente para minha formação profissional e acadêmica.

Aos professores do curso de Agronomia, pelos conhecimentos transmitidos ao longo da graduação, que foram essenciais para minha formação pessoal e profissional.

Aos colegas e amigos, pelo companheirismo, apoio e troca de experiências durante esta jornada, tornando o percurso acadêmico mais enriquecedor e agradável.

À instituição de ensino e a todos os profissionais que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho e para minha formação acadêmica.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso e para a conquista desta importante etapa da minha vida.

RESUMO

SILVA, Luciana Côrrea da. **Desempenho agrônômico do milho submetido a diferentes doses de boro e níveis de reposição hídrica**. 2026. 35p. Monografia (Curso de Bacharelado em Agronomia. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – campus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2026.

A cultura do milho possui elevada importância econômica e produtiva, e o manejo integrado da irrigação e da adubação é determinante para a expressão do potencial produtivo. Entre os micronutrientes, o boro participa de processos relacionados ao crescimento, à integridade estrutural dos tecidos e ao desenvolvimento reprodutivo das plantas. Objetivou-se avaliar os efeitos de diferentes doses de boro e de dois níveis de reposição hídrica sobre características vegetativas, de biomassa e de produção do milho. O experimento foi conduzido em vasos, em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 2×6 , com três repetições, totalizando 36 unidades experimentais. Os tratamentos foram constituídos por duas reposições hídricas, correspondentes a 50 e 100% da capacidade de campo, e seis doses de boro (0,00; 0,35; 0,70; 1,05; 1,40 e 1,75 g planta⁻¹). Foram avaliados diâmetro do colmo, altura de planta, número e dimensões foliares, acúmulo de biomassa, altura de inserção da espiga e componentes de produção. Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando aplicável, à regressão polinomial e ao desdobramento da interação entre os fatores. A reposição hídrica de 100% da capacidade de campo favoreceu o crescimento, o acúmulo de biomassa e diferentes componentes produtivos. As doses de boro apresentaram, predominantemente, respostas quadráticas, com máximos em doses intermediárias e redução do desempenho nas maiores doses. Para as variáveis com interação significativa, a resposta ao boro variou conforme a disponibilidade hídrica. Conclui-se que a manutenção da umidade próxima à capacidade de campo e o fornecimento de doses intermediárias de boro favorecem o desempenho agrônômico do milho, enquanto doses elevadas podem reduzir as respostas vegetativas e produtivas.

Palavras-chave: *Zea mays* L.; Micronutriente; Manejo da irrigação; Crescimento vegetal.

ABSTRACT

SILVA, Luciana Corrêa. **Agronomic performance of maize subjected to different boron rates and water replacement levels.** 2026. Monograph (Bachelor's Degree in Agronomy) – Federal Institute of Education, Science and Technology Goiano – Rio Verde Campus, Rio Verde, GO, 2026.

Maize is a crop of high economic and productive importance, and the integrated management of irrigation and fertilization is essential for expressing its productive potential. Among micronutrients, boron participates in processes related to plant growth, tissue structural integrity, and reproductive development. This study evaluated the effects of different boron rates and two water replacement levels on vegetative, biomass, and yield-related traits of maize. The experiment was conducted in pots using a randomized block design in a 2×6 factorial arrangement, with three replications, totaling 36 experimental units. Treatments consisted of two water replacement levels, corresponding to 50 and 100% of field capacity, and six boron rates (0.00, 0.35, 0.70, 1.05, 1.40, and 1.75 g plant⁻¹). Stem diameter, plant height, number and dimensions of leaves, biomass accumulation, ear insertion height, and yield components were evaluated. Data were subjected to analysis of variance and, when applicable, polynomial regression and interaction unfolding. Water replacement at 100% of field capacity favored growth, biomass accumulation, and several yield components. Boron rates predominantly showed quadratic responses, with maximum values at intermediate rates and reduced performance at the highest rates. For traits showing a significant interaction, the response to boron varied according to water availability. It is concluded that maintaining soil moisture near field capacity and supplying intermediate boron rates favor maize agronomic performance, whereas excessive rates may reduce vegetative and productive responses.

Keywords: *Zea mays* L.; Micronutrient; Irrigation management; Plant growth.

LISTA DE SIGLAS, ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

Siglas	Significado
AIE	Altura de Inserção da Espiga
ANOVA	Análise de Variância
AP	Altura de Planta
B	Boro
CC	Capacidade de Campo
CE	Comprimento da Espiga
CF	Comprimento da Folha
DC	Diâmetro do Colmo
DE	Diâmetro da Espiga
DS	Diâmetro do Sabugo
g	Gramas
g planta ⁻¹	Gramas por planta
LF	Largura da Folha
MG	Massa de 100 Grãos
MC	Massa do Colmo
ME	Massa da Espiga
MF	Massa da Folha
MP	Massa da Palha da Espiga
MS	Massa Seca da Planta
N	Nitrogênio
NF	Número de Folhas
NFG	Número de Fileiras de Grãos
NG	Número de Grãos
R ²	Coefficiente de Determinação

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Efeito das doses de boro sobre características vegetativas, de biomassa e de produção do milho, considerando conjuntamente as reposições hídricas de 50 e 100% da capacidade de campo. 19
- Figura 2.** Desdobramento das doses de boro dentro de cada nível de reposição hídrica para características vegetativas, de biomassa e de produção do milho. 23

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Importância econômica e agrônômica da cultura do milho	14
2.2 Exigências nutricionais da cultura do milho	15
2.3 Boro na nutrição vegetal	16
2.4 Necessidade hídrica da cultura do milho.....	17
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	18
4 RESULTADOS.....	21
4.1 Efeitos simples da reposição hídrica e das doses de boro.....	22
4.2 Efeito da interação entre a reposição hídrica e as doses de boro	27
6 CONCLUSÕES.....	32
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1 INTRODUÇÃO

A cultura do milho (*Zea mays* L.) é uma das mais importantes do mundo, desempenhando papel fundamental na alimentação humana e animal, além de servir como matéria-prima para diversas indústrias, incluindo a de biocombustíveis (ANDRADE, 2025). Sua relevância para a segurança alimentar e para os sistemas produtivos decorre da ampla utilização dos grãos e da elevada participação do cereal na alimentação e no agronegócio (BARBOSA, 2023; ZANCANARI, 2019).

Apesar de sua importância, o milho é frequentemente cultivado em segunda safra, sob condições nem sempre favoráveis ao seu pleno desenvolvimento. Nesse cenário, manter a produtividade da cultura diante de condições adversas constitui um requisito essencial para a segurança alimentar (TEJEDA, 2019).

O rendimento do milho é fortemente influenciado por fatores climáticos, especialmente pela disponibilidade de água. O déficit hídrico reduz a expansão celular, compromete a atividade fotossintética e limita a absorção e o transporte de nutrientes, com reflexos diretos sobre o crescimento e a produtividade da cultura (SELEIMAN et al., 2021; HUSSAIN et al., 2019). Esses efeitos podem ser intensificados quando a restrição hídrica ocorre em fases de elevada demanda fisiológica.

Diante dessas limitações, o suprimento adequado de nutrientes torna-se ainda mais importante para a manutenção do desenvolvimento da cultura. Embora requeridos em menores quantidades, os micronutrientes desempenham funções essenciais no metabolismo vegetal. Entre eles, destacam-se o zinco (Zn), o boro (B) e o manganês (Mn), que participam da ativação enzimática, da síntese de hormônios vegetais e de diversos processos fisiológicos fundamentais (SOUZA, 2023).

Entre os micronutrientes, o boro destaca-se por sua atuação na regulação do transporte de nutrientes, influenciando a absorção e a translocação de cálcio, potássio e nitrogênio, além de regular a atividade de transportadores nas membranas celulares, garantindo a distribuição equilibrada desses elementos na planta (BEHERA et al., 2023). Esse micronutriente é essencial tanto nas fases vegetativas quanto reprodutivas, e sua deficiência pode comprometer as trocas gasosas, a eficiência fotossintética e, consequentemente, a produtividade da cultura (FUJIYAMA, 2019).

Além disso, o boro está diretamente relacionado à viabilidade do pólen e ao sucesso da fertilização, influenciando a produção da cultura. Sua participação na síntese de polissacarídeos, como a pectina, contribui para a formação e a estabilidade da parede celular,

favorecendo o crescimento, a expansão celular e a integridade estrutural das plantas ao longo do desenvolvimento (SAFDAR et al., 2023).

Em razão dessas funções, a deficiência de boro pode causar efeitos prejudiciais ao milho. Estima-se que as perdas de produtividade associadas à deficiência desse micronutriente tendam a se tornar mais frequentes em cenários de mudanças climáticas, nos quais a cultura será cada vez mais afetada pela seca (YIN et al., 2021). Entre os principais efeitos da deficiência de B destacam-se alterações no desenvolvimento da folha bandeira, na germinação dos grãos de pólen e na formação do tubo polínico (FAGAN et al., 2016).

A disponibilidade de boro no solo é influenciada por fatores como teor de matéria orgânica, textura, umidade e interações antagônicas com outros íons, como N, K e Ca (CRUZ et al., 2022). Dentre esses fatores, a umidade do solo assume papel central, uma vez que o transporte de boro até as raízes ocorre predominantemente pela água. Assim, o manejo integrado da irrigação e da adubação boratada torna-se fundamental para garantir níveis adequados desse micronutriente durante o ciclo da cultura. A adoção de estratégias que conciliem o fornecimento adequado de água e boro contribui para maior eficiência no uso dos recursos, favorecendo o crescimento vegetal, a formação dos grãos e a obtenção de elevados rendimentos e qualidade da produção (ZHAO et al., 2020).

Diante desse contexto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar os efeitos de diferentes doses de boro e de duas reposições hídricas sobre características agrônômicas e produtivas do milho. Especificamente, busca-se determinar a dose de boro que proporciona os melhores resultados de crescimento e produtividade, identificar o nível de reposição hídrica mais adequado ao desenvolvimento da cultura, avaliar os efeitos da interação entre doses de boro e reposição hídrica e analisar os parâmetros biométricos e os componentes de produção, visando identificar as condições mais favoráveis ao desempenho agrônômico do milho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância econômica e agrônômica da cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas agrícolas mais produzidas no mundo, desempenhando papel fundamental na alimentação humana e animal, além de ser matéria-prima para a fabricação de diversos produtos, como bebidas, polímeros e biocombustíveis (SILVA et al., 2020). No Brasil, a cultura é cultivada em dois períodos distintos, denominados safra e segunda safra (safrinha), consolidando-se como uma das principais commodities do agronegócio nacional.

Nos últimos anos, o milho de segunda safra tem apresentado crescimento expressivo em todo o território nacional, tornando-se responsável pela maior parte da produção brasileira. Para a safra 2025/26, a produção nacional é estimada em 140,5 milhões de toneladas, representando uma redução de 0,5% em relação ao ciclo anterior, resultado do elevado desempenho produtivo alcançado na safra precedente, favorecida por condições climáticas especialmente adequadas (CONAB, 2026).

A relevância econômica da cultura está diretamente associada à sua ampla utilização e elevada capacidade produtiva, influenciando os mercados nacional e internacional. O milho é uma espécie C4, anual, estival, monóica, pertencente à família Poaceae, caracterizada por ampla adaptação a diferentes condições ambientais e elevada eficiência fotossintética. Apresenta porte ereto, baixo afilamento e sistema radicular que pode alcançar até 60 cm de profundidade, características que contribuem para seu desempenho agrônomo e ampla distribuição geográfica (VELJKOVIĆ et al., 2018; HUSSAIN et al., 2019).

Devido ao seu elevado potencial produtivo, a cultura do milho apresenta alta exigência nutricional e responde ao manejo adequado da fertilidade do solo. O equilíbrio no fornecimento de nutrientes é essencial para a manutenção do crescimento, da atividade fisiológica e da formação dos componentes de produção (MORAIS et al., 2015; RAHMAN; SCHOENAU, 2022). Nesse contexto, tecnologias associadas ao manejo nutricional podem contribuir para maior eficiência no uso de fertilizantes e melhor desempenho agrônomo.

2.2 Exigências nutricionais da cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura de elevada importância para a alimentação, a produção animal e diferentes segmentos industriais. Sua ampla adaptação e seu elevado potencial produtivo justificam a necessidade de estratégias de manejo capazes de manter o crescimento e a produção em diferentes ambientes de cultivo (SILVA et al., 2020).

Para expressar seu potencial produtivo, a cultura depende de um suprimento equilibrado de nutrientes, incluindo os micronutrientes. Embora requeridos em pequenas quantidades, esses elementos exercem funções essenciais no metabolismo vegetal, e sua deficiência ou excesso pode comprometer processos fisiológicos como crescimento, fotossíntese e respiração (MORAIS et al., 2015).

Nesse contexto, o boro destaca-se por sua importância no desenvolvimento e na produtividade do milho. Sua aplicação deve seguir recomendações específicas para cada região e tipo de solo, considerando fatores como a disponibilidade inicial do micronutriente, a

capacidade de retenção do solo e as exigências nutricionais da cultura. O fornecimento adequado de boro favorece o crescimento das plantas, a formação e o enchimento dos grãos, refletindo positivamente na produtividade. Além dos benefícios agrônômicos, o manejo racional desse micronutriente contribui para a eficiência no uso de fertilizantes, reduz perdas e promove sistemas de produção mais sustentáveis (RAHMAN; SCHOENAU, 2022).

Dessa forma, o uso adequado de boro pode gerar impactos positivos tanto na rentabilidade dos produtores quanto no desenvolvimento socioeconômico das regiões agrícolas, fortalecendo os princípios da agricultura.

2.3 Boro na nutrição vegetal

O boro (B) desempenha funções essenciais no crescimento e desenvolvimento das plantas, participando da divisão celular, da atividade enzimática e do transporte de açúcares através das membranas celulares. Além disso, atua na síntese de ácidos nucleicos e no processo de germinação dos grãos de pólen, sendo indispensável para a fecundação e a formação dos frutos. Esse micronutriente também influencia o crescimento do sistema radicular, favorecendo a absorção de água e nutrientes necessários ao desenvolvimento vegetal. Na natureza, o boro ocorre principalmente em rochas sedimentares marinhas e de origem vulcânica, podendo também estar presente em depósitos minerais associados a ambientes marinhos (SALDANHA et al., 2016).

Em razão de sua importância fisiológica, diversos estudos têm destacado o papel do boro na nutrição vegetal. O sinergismo entre boro e cálcio favorece o alongamento celular, o crescimento do tubo polínico e o desenvolvimento radicular, influenciando indiretamente a absorção de água e nutrientes pelas plantas (OLDONI, 2016). Além disso, o boro é absorvido predominantemente na forma de ácido bórico e pode ser fornecido por diferentes estratégias de manejo, incluindo aplicação em pré-plantio associada à dessecação, distribuição a lanço, aplicação no sulco de semeadura e pulverizações foliares nos estádios de maior demanda da cultura (SILVA et al., 2015).

Nesse contexto, diferentes métodos podem ser utilizados para o fornecimento de boro às plantas, cada um com características específicas. Os fertilizantes granulados estão entre as formas mais empregadas, devido à facilidade de aplicação e distribuição no solo. As aplicações foliares permitem rápida absorção do micronutriente, sendo especialmente eficientes na correção de deficiências. A fertirrigação, por sua vez, possibilita a aplicação do boro juntamente com a água de irrigação, favorecendo uma distribuição mais uniforme ao longo do ciclo da

cultura. Em sistemas de agricultura de precisão, o nutriente pode ser aplicado de forma localizada, direcionando-se às áreas com maior necessidade, aumentando a eficiência do uso dos fertilizantes. Além disso, fontes orgânicas, como esterco compostado e resíduos vegetais, constituem alternativas sustentáveis para o fornecimento de boro, contribuindo para a nutrição das plantas e para a manutenção da fertilidade do solo (ACHAW; DANSO-BOATENG, 2021).

Em milho, a deficiência de boro pode comprometer principalmente tecidos jovens e o sistema radicular, com reflexos sobre o crescimento e a aquisição de água e nutrientes. A intensidade dessas respostas depende da disponibilidade do micronutriente no solo e das condições ambientais e de manejo, reforçando a necessidade de evitar tanto a deficiência quanto o excesso de B (BIENERT et al., 2023).

2.4 Necessidade hídrica da cultura do milho

De acordo com as projeções, o milho é uma cultura estratégica para a agricultura brasileira, sendo cultivado em mais de 2 milhões de estabelecimentos agropecuários. Nas últimas décadas, essa gramínea passou por importantes transformações, caracterizadas pela redução da produção voltada à subsistência e pela ampliação de sua participação em sistemas agrícolas tecnificados e altamente competitivos. Esse processo foi acompanhado por mudanças na distribuição espacial e temporal da produção, consolidando o milho como uma das principais commodities agrícolas do país. Apesar da expansão do mercado brasileiro, ainda persistem desafios que limitam o pleno desenvolvimento e a competitividade da cultura (BARBOSA, 2023; CONTINI et al., 2019).

Nesse cenário, a interação entre fatores climáticos, edáficos e de manejo exerce papel fundamental no desempenho da cultura, pois influencia diretamente o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das plantas (HUSSAIN et al., 2019). Com o avanço das mudanças climáticas, a frequência e a intensidade dos estresses abióticos e bióticos têm aumentado, elevando a vulnerabilidade do milho e comprometendo seu potencial produtivo. Além disso, a ocorrência simultânea de múltiplos fatores de estresse pode desencadear respostas fisiológicas complexas e prejudiciais ao desenvolvimento vegetal (TAO; CHEN, 2025).

Entre os estresses abióticos, o déficit hídrico destaca-se como um dos principais fatores limitantes da produtividade do milho, por interferir em processos fisiológicos essenciais, como a expansão celular, a assimilação de carbono e a eficiência fotossintética (SELEIMAN et al., 2021). A deficiência de água provoca alterações estruturais e funcionais nos cloroplastos, incluindo a desorganização das membranas tilacoidais e danos ao fotossistema II, resultando

em fotoinibição e redução da eficiência fotoquímica (SUN et al., 2023). Como consequência, ocorre comprometimento do metabolismo vegetal, redução do crescimento e diminuição do potencial produtivo da cultura.

A adequada disponibilidade hídrica é, portanto, indispensável para o crescimento, o desenvolvimento e a expressão do potencial produtivo das plantas. Quando o suprimento de água não atende às exigências fisiológicas da cultura, são desencadeadas alterações metabólicas e morfofisiológicas que afetam negativamente o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo (CAMPOS; SANTOS; NACARATH, 2021). No milho, o estresse hídrico pode reduzir a altura das plantas, o diâmetro do colmo e os componentes de produção, além de comprometer a atividade fotossintética em decorrência da menor expansão celular e de danos ao aparato fotossintético (SILVA et al., 2021; GUIMARÃES; ROCHA; PATERNIANI, 2019).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em vasos no espaço experimental do Laboratório de Irrigação e Drenagem do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, no sudoeste de Goiás, localizado a 17°47'53" de latitude Sul, 50°55'41" de longitude Oeste e 743 m de altitude. O solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico (SANTOS et al., 2018). As características químicas do solo são apresentadas na Tabela 1. Foi realizado a calagem e adubações seguindo a recomendação de adubação para a cultura segundo Souza e Lobato (2004)

Tabela 1. Propriedades química do solo para plantio do milho.

Propriedades químicas								
(CaCl ₂)	g dm ⁻³	%			mmolc dm ⁻³			
pH	MO	V	m	CTC	Ca	Mg	Al	H+Al
5	32	44	8	83,5	20	11	3	47
mg dm ⁻³	mg dm ⁻³				mmolc dm ⁻³			
P-resina	S-SO ₄	B	Cu	Fe	Mn	Zn	K	SB
8	5	0,19	2,5	28	14,7	0,6	5,5	36,5

pH: potencial hidrogeniônico determinado em CaCl₂; P-resina: fósforo extraído pelo método da resina; MO: matéria orgânica; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; H+Al: acidez potencial; Al: alumínio; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; Ca/CTC: participação do cálcio na CTC;

Mg/CTC: participação do magnésio na CTC; S-SO₄: enxofre na forma de sulfato; B: boro; Cu: cobre; Fe: ferro; Mn: manganês; Zn: zinco.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 2×6 , com três repetições, totalizando 36 unidades experimentais. Os tratamentos foram constituídos por duas reposições hídricas, correspondentes a 50 e 100% da capacidade de campo, e seis doses de boro adicionadas ao solo: 0,00; 0,35; 0,70; 1,05; 1,40 e 1,75 g planta⁻¹. Como fonte do micronutriente boro, utilizou-se o ácido bórico (H₃BO₃), contendo 17% de B, aplicado via solo. O manejo hídrico foi realizado utilizando sensores ECH2O 10HS do grupo Meter.

Foram utilizados vasos com capacidade de 21 L, preenchidos com solo representativo da região. A caracterização inicial do solo foi realizada conforme os procedimentos descritos por Teixeira et al. (2017), conforme a Tabela 2. Em cada vaso foram semeadas cinco sementes de milho e, aos 15 dias após a semeadura (DAS), realizou-se o desbaste, mantendo-se uma planta por unidade experimental para a aplicação dos tratamentos e a realização das avaliações. Como material vegetal, utilizou-se o híbrido de milho LG 36799 VIP3, desenvolvido pela empresa Limagrain (Limagrain Brasil, Sorriso, MT, Brasil).

Tabela 2. Propriedades granulométricas do solo.

Propriedades granulométricas		
g kg ⁻¹		
Argila	Areia total	Silte
375	432	193

A altura de planta (AP) foi mensurada da superfície do solo até a base do pendão. O diâmetro do colmo (DC) foi medido próximo à superfície do solo com paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm. Para o número de folhas (NF), foram contabilizadas apenas as folhas completamente expandidas. O comprimento (CF) e a largura (LF) foliar foram determinados na quarta folha, contada da base para o ápice, sendo a largura medida na região de maior expansão do limbo.

Ao final do ciclo, foram avaliadas a altura de inserção da espiga (AIE), medida da superfície do solo até o ponto de inserção da espiga, e as variáveis relacionadas ao acúmulo de biomassa. Após a separação dos órgãos vegetais e secagem em estufa, foram determinadas a massa seca da planta (MS), a massa da folha (MF), a massa do colmo (MC), a massa da espiga

(ME) e a massa da palha da espiga (MP), de acordo com as variáveis utilizadas na análise estatística.

Na colheita, também foram avaliados os componentes de produção. O comprimento da espiga (CE) foi mensurado com régua graduada, enquanto o diâmetro da espiga (DE) e o diâmetro do sabugo (DS) foram determinados com paquímetro digital. Foram contabilizados o número de fileiras de grãos por espiga (NFG) e o número de grãos (NG). A massa de 100 grãos (MG) foi obtida por pesagem em balança, constituindo uma das variáveis utilizadas para avaliar a resposta produtiva aos tratamentos.

Os dados foram analisados considerando o delineamento em blocos casualizados e o esquema fatorial constituído por duas reposições hídricas (50 e 100% da capacidade de campo) e seis doses de boro (0,00; 0,35; 0,70; 1,05; 1,40 e 1,75 g planta⁻¹), com três blocos e 36 unidades experimentais. Inicialmente, foram calculadas estatísticas descritivas, incluindo média, desvio-padrão e coeficiente de variação. A distribuição das observações e dos resíduos foi examinada por histogramas, curvas de densidade, gráficos quantil–quantil e boxplots por tratamento. A normalidade dos resíduos foi avaliada pelo teste de Shapiro–Wilk, adotando-se nível de significância de 5%.

Para cada variável-resposta foi ajustado um modelo de análise de variância contendo os efeitos de bloco, reposição hídrica, dose de boro e a interação entre reposição hídrica e dose de boro. Quando a interação não foi significativa, foram interpretados os efeitos principais. O efeito das reposições hídricas foi avaliado pelo teste F da análise de variância, uma vez que esse fator apresentou apenas dois níveis.

O efeito das doses de boro foi avaliado por regressão polinomial, testando-se os componentes linear e quadrático. O modelo quadrático foi selecionado quando seu componente foi significativo; na ausência de significância quadrática, adotou-se o modelo linear quando significativo. Somente regressões significativas foram representadas graficamente, acompanhadas da equação ajustada, do coeficiente de determinação (R^2) e do valor de probabilidade associado ao efeito de boro.

Quando a interação entre reposição hídrica e dose de boro foi significativa, procedeu-se ao desdobramento dos efeitos simples. As reposições hídricas foram comparadas dentro de cada dose de boro pelo teste F, utilizando-se o quadrado médio residual do modelo fatorial completo. Para atender ao pressuposto de normalidade, as variáveis massa seca da planta e massa seca da folha foram analisadas após transformação inversa. Os resultados e os pontos de máximo foram

interpretados na escala original. As análises estatísticas foram realizadas no software R, adotando-se nível de significância de 5% de probabilidade.

4 RESULTADOS

Observa-se na análise de variância a interação significativa entre lâminas de irrigação e doses de boro para massa da folha, massa do colmo, massa de 100 grãos e altura de inserção da espiga (Tabela 3). Na ausência de interação significativa, foram constatados efeitos isolados das lâminas e das doses de boro sobre diâmetro do colmo, altura de planta, massa seca da planta, massa da espiga, massa da palha da espiga, número de grãos, diâmetro e comprimento da espiga e diâmetro do sabugo. O número de folhas, o comprimento da folha e a largura da folha foram influenciados apenas pelas doses de boro (Tabela 2). O número de fileiras de grãos não apresentou resposta significativa às lâminas, às doses de boro ou à interação entre os fatores. Os coeficientes de variação oscilaram entre 2,56 e 8,16%, indicando elevada precisão experimental e baixa variabilidade residual.

Tabela 3. Resumo da análise de variância e avaliação da normalidade dos resíduos para características vegetativas, de biomassa e de produção do milho submetido a lâminas de irrigação e doses de boro. DC. Diâmetro do colmo (mm); AP. Altura de planta (cm); NF. Número de folhas (un.); MS. Massa seca da planta; MF. Massa da folha; MC. Massa do colmo; ME. Massa da espiga (g); MP. Massa da palha da espiga (g); NFG. Número de fileiras (Un.); NG. Número de grãos; DE. Diâmetro da espiga; CE. Comprimento da espiga (cm); MG. Massa de 100 grãos (g); DS. Diâmetro do sabugo (mm); CF. Comprimento da folha (cm); LF. Largura da folha (cm); AIE. Altura de inserção da espiga.

Variável resposta	Shapiro-Wilk	p valor			CV%
		Lâmina (L)	Boro (B)	L x B	
DC. Diâmetro do colmo (mm)	0,0572	0,0001	0,0001	0,4540	3,10
AP. Altura de planta (cm)	0,7296	0,0047	0,0001	0,4483	2,56
NF. Número de folhas (un.)	0,5634	0,2517	0,0491	0,9919	8,16
MS. Massa seca da planta	0,1651	0,0001	0,0001	0,2337	3,65
MF. Massa seca da folha	0,0731	0,0001	0,0001	0,0398	3,50
MC. Massa do colmo	0,0332	0,0001	0,0001	0,0152	3,21
ME. Massa da espiga	0,5776	0,0028	0,0001	0,5405	4,02
MP. Massa da Palha da espiga	0,2410	0,0001	0,0001	0,5610	4,20

NFG. Número de fileiras	0,3185	0,1706	0,2530	0,9230	6,68
NG. Número de grãos	0,6242	0,0003	0,0001	0,9839	2,87
DE. Diâmetro da espiga	0,9759	0,0489	0,0001	0,9820	2,59
CE. Comprimento da espiga (cm)	0,0506	0,0143	0,0001	0,8761	2,84
MG. Massa de 100 grãos (g)	0,7512	0,0001	0,0001	0,0039	3,60
DS. Diâmetro do sabugo	0,0692	0,0005	0,0002	0,9808	3,88
CF. Comprimento da folha (cm)	0,8959	0,1694	0,0001	0,7909	3,49
LF. Largura da folha (cm)	0,5043	0,8762	0,0048	0,7024	3,65
AIE. Altura de inserção da espiga	0,9415	0,0001	0,0001	0,0330	3,52

4.1 Efeitos simples da reposição hídrica e das doses de boro

A lâmina de 100% proporcionou médias significativamente superiores às obtidas com a lâmina de 50% para todas as características avaliadas. O diâmetro do colmo aumentou de 18,00 para 18,96 mm, correspondendo a um incremento de 5,33%, enquanto a altura de planta passou de 170,26 para 174,89 cm, com aumento de 2,72%. Os maiores incrementos relativos foram observados nas variáveis relacionadas ao acúmulo de biomassa. A massa seca da planta aumentou 17,01%, passando de 24,45 para 28,61 g, e a massa da palha da espiga aumentou 10,14%, de 36,10 para 39,76 g, sendo ambas significativamente favorecidas pela lâmina de 100%.

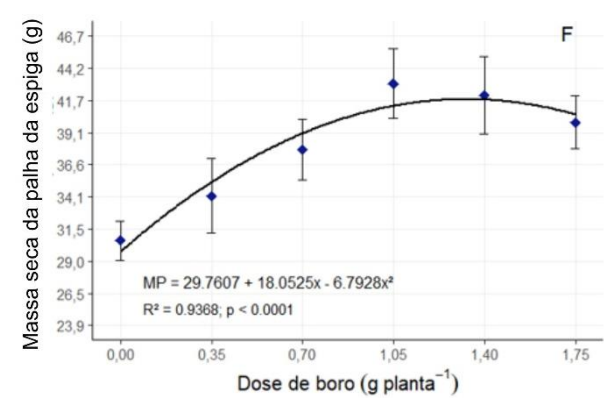
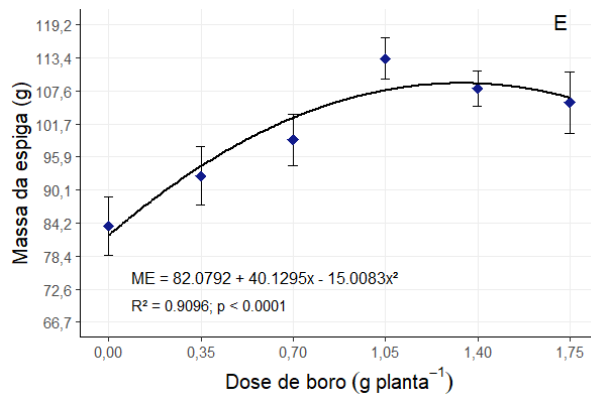
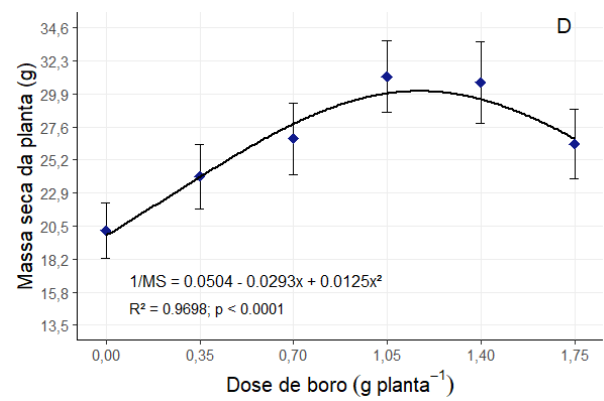
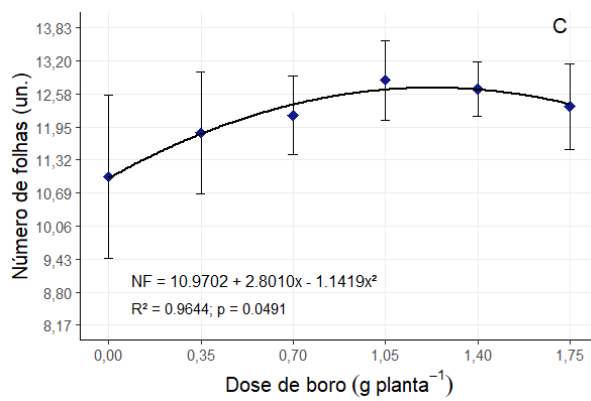
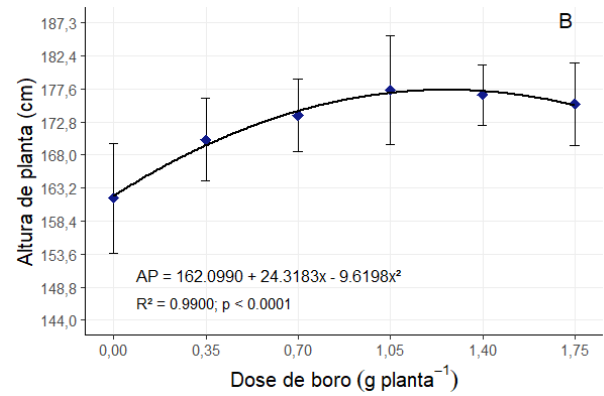
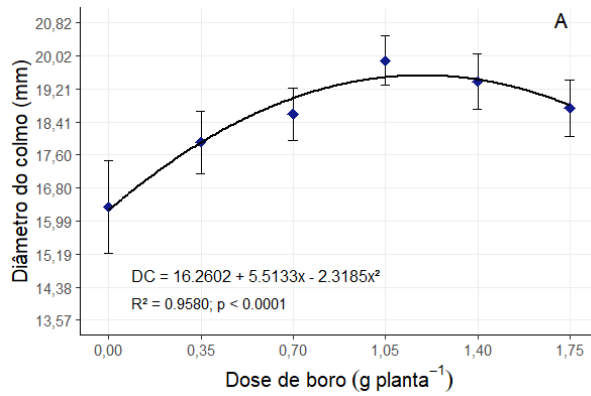
A maior disponibilidade hídrica também favoreceu os componentes produtivos (Tabela 4). A massa da espiga aumentou de 98,08 para 102,60 g (+4,61%), e o número de grãos passou de 32,36 para 33,69 (+4,11%). Também foram registrados incrementos no diâmetro da espiga (+1,82%), comprimento da espiga (+2,51%) e diâmetro do sabugo (+5,48%).

Tabela 4. Efeito das reposições hídricas sobre características vegetativas, de biomassa e de produção do milho, considerando a média das doses de boro. As reposições hídricas corresponderam a 50 e 100% da capacidade de campo. Os valores são apresentados como média $\pm$ desvio-padrão. Letras maiúsculas diferentes na linha indicam diferença entre as reposições hídricas pelo teste F a 5% de probabilidade. CV = coeficiente de variação.

Variável resposta	Lâmina de 50%	Lâmina de 100%	p Valor	CV%
Diâmetro do colmo (mm)	18,00 $\pm$ 1,45 B	18,96 $\pm$ 1,11 A	<0,001	3,10
Altura de planta (cm)	170,26 $\pm$ 8,87 B	174,89 $\pm$ 6,57 A	0,0047	2,56

Massa seca da planta (g)	24,45 ± 3,76 B	28,61 ± 4,18 A	<0,001	3,65
Massa seca da palha da espiga (g)	36,10 ± 4,50 B	39,76 ± 4,91 A	<0,001	4,20
Massa da espiga (g)	98,08 ± 12,08 B	102,60 ± 9,44 A	0,0028	4,02
Número de grãos (un.)	32,36 ± 1,68 B	33,69 ± 1,74 A	<0,001	2,87
Diâmetro da espiga (mm)	41,84 ± 1,59 B	42,60 ± 1,60 A	0,0489	2,59
Comprimento da espiga (cm)	12,75 ± 0,84 B	13,07 ± 0,95 A	0,0143	2,84
Diâmetro do sabugo (mm)	24,82 ± 1,16 B	26,18 ± 1,52 A	<0,001	3,88

O diâmetro do colmo (Figura 1A) apresentou resposta quadrática às doses de boro. A partir do modelo ajustado, o ponto de máximo foi estimado em 1,19 g planta⁻¹ de boro, correspondente a um diâmetro de 19,54 mm. Esse valor representa incremento estimado de 20,16% em relação aos 16,26 mm previstos na ausência de boro. Enquanto a altura de planta aumentou de forma quadrática com as doses de boro (Figura 1B). A máxima altura foi estimada em 177,47 cm, obtida com 1,26 g planta⁻¹ de boro. Estimando incremento de 9,48% (162,10 cm).



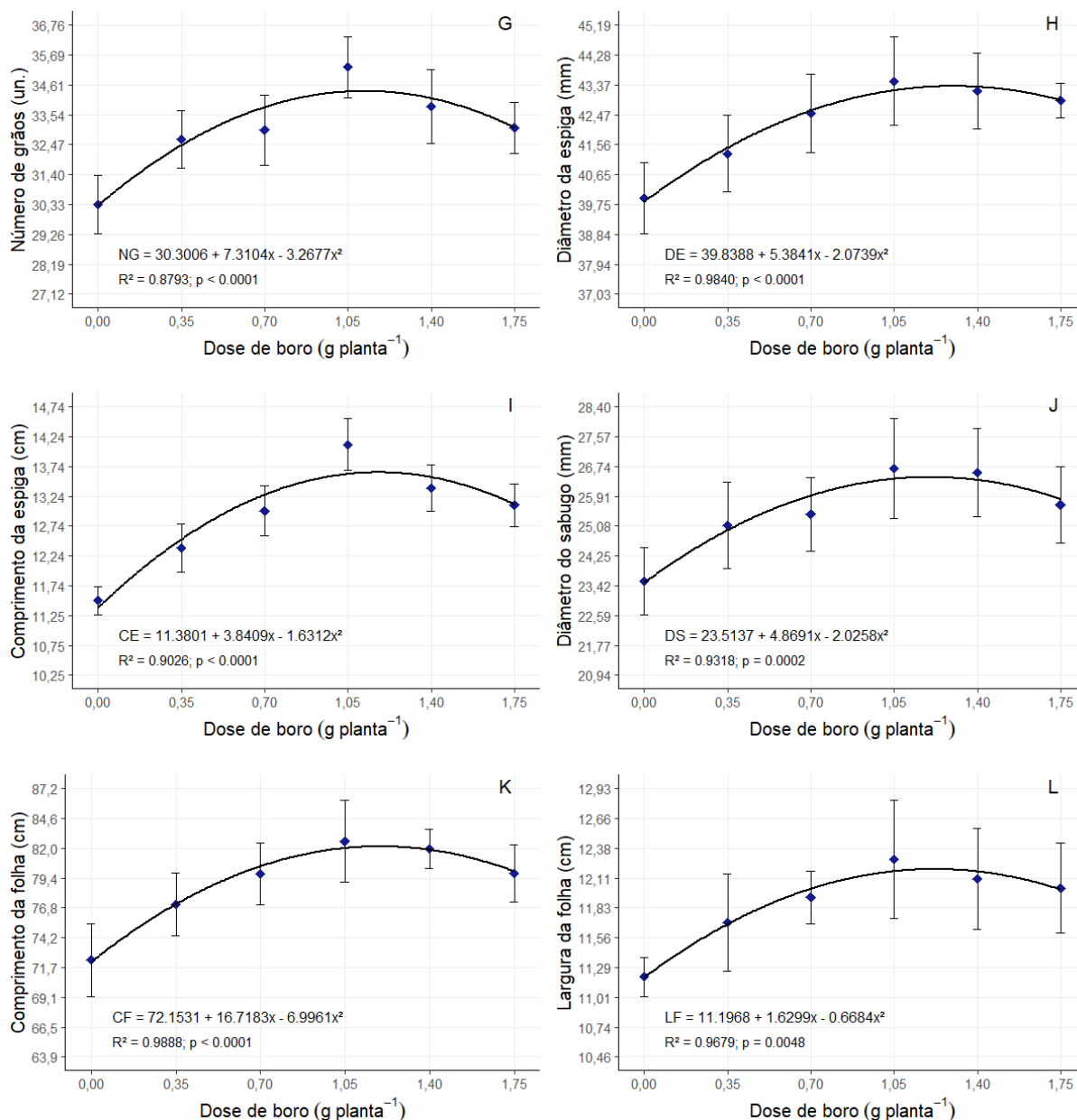


Figura 1. Efeito das doses de boro em plantas de milho, considerando conjuntamente as lâminas correspondentes a 50 e 100% da capacidade de campo. Os símbolos representam as médias e as barras verticais, os desvios-padrão. A linha contínua representa o modelo de regressão quadrática ajustado. A equação, o coeficiente de determinação (R^2) e o valor de probabilidade associado à regressão são apresentados no interior do painel. A, diâmetro do colmo (DC, mm); B, altura de planta (AP, cm); C, número de folhas (NF, un.); D, massa seca da planta (MS, g); E, massa da espiga (ME, g); F, massa da palha da espiga (MP, g); G, número de grãos (un.); H, diâmetro da espiga (DE, mm); I, comprimento da espiga (CE, cm); J, diâmetro do sabugo (DS, mm); K, comprimento da folha (CF, cm); L, largura da folha (LF, cm).

O número de folhas apresentou resposta quadrática significativa às doses de boro (Figura 1C). O ponto de máximo foi estimado em 1,23 g planta⁻¹, resultando em 12,69 folhas por planta. Esse valor foi 15,66% superior às 10,97 folhas estimadas na ausência de boro. De acordo com a Figura 1D, a massa seca apresentou resposta quadrática após a transformação inversa dos dados. O ponto mínimo da variável transformada, correspondente ao máximo na escala original, foi estimado em 1,17 g planta⁻¹ de boro, proporcionando massa seca de aproximadamente 30,09 g. Em comparação aos 19,84 g estimados na dose zero, esse resultado representa incremento de 51,67%.

A massa da espiga apresentou resposta quadrática às doses de boro (Figura 1E). A dose de 1,34 g planta⁻¹ proporcionou a máxima massa estimada de 108,90 g por espiga, correspondente a um incremento de 32,68% em relação aos 82,08 g estimados na ausência de aplicação. Para a massa da palha da espiga (Figura 1F) observa-se comportamento quadrático, com aumento até a dose estimada de 1,33 g planta⁻¹ de boro. Nesse ponto, a massa máxima foi de 41,75 g, representando incremento de 40,30% em comparação aos 29,76 g estimados na dose zero.

O número de grãos apresentou ajuste quadrático significativo (Figura 1G). A máxima resposta foi estimada em 34,39 grãos, obtida com 1,12 g planta⁻¹ de boro. Esse resultado corresponde a um incremento de 13,49% em relação aos 30,30 grãos previstos na ausência de boro. Na Figura 1H observa-se que o diâmetro da espiga aumentou com as doses de boro, com resposta quadrática. O ponto de máximo foi estimado em 1,30 g planta⁻¹, correspondente ao diâmetro de 43,33 mm. Comparativamente aos 39,84 mm estimados na ausência de boro, verificou-se incremento de 8,77%.

O comprimento da espiga apresentou resposta quadrática às doses de boro (Figura 1I). A máxima dimensão foi estimada em 13,64 cm, na dose de 1,18 g planta⁻¹. Esse valor representa incremento de 19,87% em relação aos 11,38 cm estimados na ausência de boro. O diâmetro do sabugo (Figura 1J) apresentou ajuste quadrático significativo. O ponto de máximo foi estimado em 1,20 g planta⁻¹ de boro, correspondente a um diâmetro de 26,44 mm. Em comparação aos 23,51 mm estimados na dose zero, o incremento foi de 12,44

O comprimento da folha apresentou resposta quadrática às doses de boro (Figura 1K). A máxima resposta estimada foi de 82,14 cm, obtida na dose de 1,19 g planta⁻¹. Esse valor foi 13,84% superior aos 72,15 cm estimados na ausência de boro. Enquanto a largura da folha (Figura 1L) apresentou comportamento quadrático significativo. O ponto de máximo foi

estimado em 1,22 g planta⁻¹ de boro, correspondente à largura de 12,19 cm. Em relação aos 11,20 cm estimados na dose zero, ocorreu incremento de 8,87%.

4.2 Efeito da interação entre a reposição hídrica e as doses de boro

A interação entre lâminas de irrigação e doses de boro foi caracterizada por respostas distintas conforme a variável e a dose aplicada (Tabela 5). De modo geral, a lâmina de 100% proporcionou os maiores valores, embora sua superioridade tenha ocorrido apenas em doses específicas, confirmando a dependência do efeito hídrico em relação à disponibilidade de boro. Para a altura de inserção da espiga, a lâmina de 100% foi superior nas doses de 0,70, 1,05 e 1,40 g planta⁻¹. Nessas doses, os valores aumentaram de 74,00 para 79,50 cm (+7,43%), de 75,16 para 85,16 cm (+13,30%) e de 74,50 para 80,00 cm (+7,38%), respectivamente. A maior diferença entre as lâminas ocorreu em 1,05 g planta⁻¹, com incremento absoluto de 10,00 cm. Nas doses de 0,00, 0,35 e 1,75 g planta⁻¹, as lâminas não diferiram.

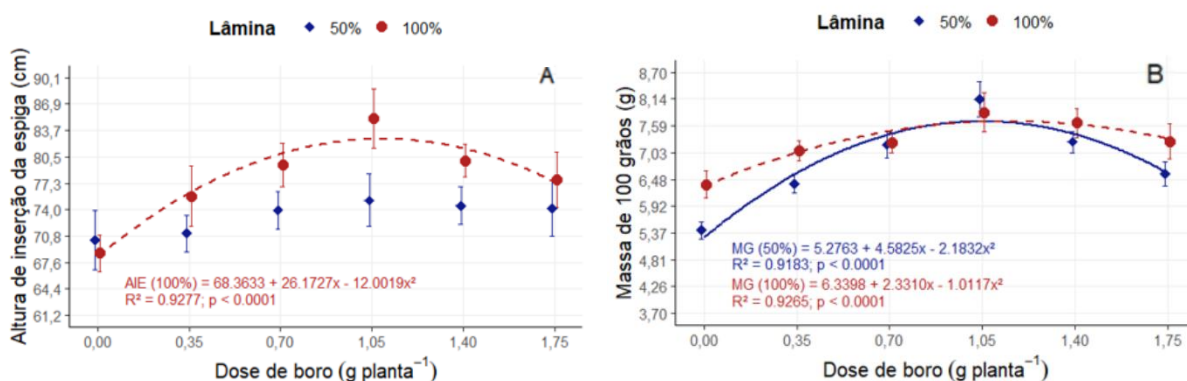
Tabela 5. Desdobramento das reposições hídricas dentro de cada dose de boro para características vegetativas, de biomassa e de produção do milho. Os valores são apresentados como média ± desvio-padrão. Para cada variável e dose de boro, letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre as reposições de 50 e 100% da capacidade de campo pelo teste F a 5% de probabilidade. CV = coeficiente de variação.

Variável (unidade)	Lâmina	Dose de boro (g planta ⁻¹)						CV (%)
		0,00	0,35	0,70	1,05	1,40	1,75	
Características vegetativas								
Altura de inserção da espiga (cm)	50%	70,34 ± 3,62 A	71,17 ± 2,22 A	74,00 ± 2,29 B	75,16 ± 3,19 B	74,50 ± 2,29 B	74,24 ± 3,46 A	3,52
	100%	68,73 ± 2,19 A	75,66 ± 3,69 A	79,50 ± 2,61 A	85,16 ± 3,59 A	80,00 ± 2,00 A	77,66 ± 3,33 A	
Massa de 100 grãos (g)	50%	5,42 ± 0,18 B	6,40 ± 0,20 B	7,20 ± 0,28 A	8,14 ± 0,36 A	7,26 ± 0,22 A	6,59 ± 0,25 B	3,60
	100%	6,37 ± 0,28 A	7,07 ± 0,21 A	7,24 ± 0,20 A	7,87 ± 0,41 A	7,65 ± 0,30 A	7,27 ± 0,36 A	
Massa seca da folha (g)	50%	30,51 ± 1,06 B	33,87 ± 1,15 B	39,83 ± 1,60 A	44,22 ± 1,32 A	41,00 ± 2,02 B	39,68 ± 1,54 A	3,50
	100%	32,74 ± 0,89 A	39,61 ± 1,68 A	41,59 ± 1,80 A	46,35 ± 1,30 A	44,56 ± 1,71 A	41,74 ± 1,86 A	
Massa do colmo (g)	50%	83,92 ± 3,01 A	95,19 ± 1,96 B	99,21 ± 2,28 B	110,28 ± 3,88 B	105,56 ± 3,57 B	99,46 ± 2,47 B	3,21
	100%	82,36 ± 2,26 A	103,21 ± 3,71 A	105,23 ± 2,41 A	120,80 ± 3,31 A	114,16 ± 4,33 A	113,01 ± 4,04 A	

A massa de 100 grãos foi superior sob a lâmina de 100% nas doses de 0,00, 0,35 e 1,75 g planta⁻¹ (Tabela 3). Na ausência de boro, a massa aumentou de 5,42 para 6,37 g, correspondendo a um incremento de 17,53%. Nas doses de 0,35 e 1,75 g planta⁻¹, os incrementos foram de 10,47 e 10,32%, respectivamente. Entre 0,70 e 1,40 g planta⁻¹, não foram detectadas diferenças entre as lâminas, mesmo quando as médias apresentaram pequenas variações numéricas.

Para a massa seca da folha, a lâmina de 100% proporcionou resultados superiores nas doses de 0,00, 0,35 e 1,40 g planta⁻¹. Os valores aumentaram de 30,51 para 32,74 g (+7,31%), de 33,87 para 39,61 g (+16,95%) e de 41,00 para 44,56 g (+8,68%), respectivamente. A maior diferença ocorreu na dose de 0,35 g planta⁻¹, com acréscimo absoluto de 5,74 g sob a lâmina de 100%. Nas doses de 0,70, 1,05 e 1,75 g planta⁻¹, as lâminas não diferiram. A massa seca do colmo apresentou a resposta mais consistente à maior disponibilidade hídrica. Na ausência de boro, não houve diferença entre as lâminas. Entretanto, no fornecimento de boro, a lâmina de 100% resultou em valores significativamente superior, com incrementos de 8,43; 6,07; 9,54; 8,15 e 13,62%, respectivamente. A maior diferença ocorreu na dose de 1,75 g planta⁻¹, quando a massa seca do colmo aumentou de 99,46 para 113,01 g.

Sob a lâmina de 50%, a altura de inserção da espiga não apresentou resposta significativa às doses de boro. As médias oscilaram entre 70,34 e 75,16 cm. Sob a lâmina de 100%, houve resposta quadrática (Figura 2A), com aumento até a dose estimada de 1,09 g planta⁻¹, correspondente à altura máxima de 82,63 cm. Em relação aos 68,36 cm estimados na ausência de boro, o incremento foi de 20,87%. Acima dessa dose, o modelo indicou redução da altura de inserção da espiga.



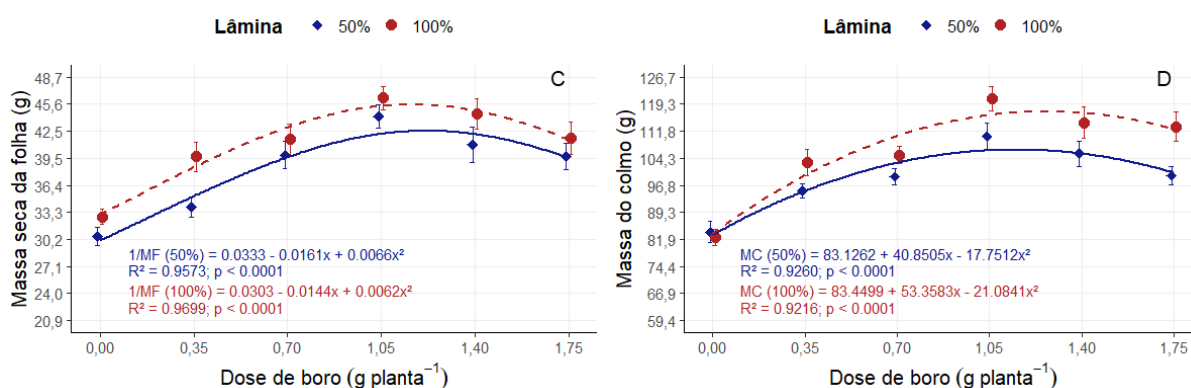


Figura 2. Desdobramento das doses de boro dentro de cada nível de reposição hídrica para características vegetativas, de biomassa e de produção do milho. Os símbolos representam as médias e as barras verticais, os desvios-padrão. As linhas contínuas azuis e tracejadas vermelhas representam os modelos de regressão ajustados para as reposições de 50 e 100% da capacidade de campo, respectivamente. As equações, os coeficientes de determinação (R^2) e os valores de probabilidade são apresentados nos respectivos painéis.

A massa de 100 grãos apresentou resposta quadrática às doses de boro nas duas lâminas (Figura 2B). Sob a lâmina de 50%, o modelo apresentou resposta quadrática, com máximo estimado de 7,68 g na dose de 1,05 g planta⁻¹. Esse valor representa incremento de 45,57% em relação aos 5,28 g estimados na dose zero. Sob a lâmina de 100%, o máximo também foi de aproximadamente 7,68 g, porém obtido na dose estimada de 1,15 g planta⁻¹, com incremento de 21,18% em relação aos 6,34 g previstos na ausência de boro.

A massa seca da folha apresentou resposta quadrática às doses de boro em ambas as lâminas, após transformação inversa dos dados (Figura 2C). Sob a lâmina de 50%, o mínimo da variável transformada, correspondente ao máximo na escala original, ocorreu na dose de 1,22 g planta⁻¹, proporcionando massa seca estimada de 42,59 g. Esse valor foi 41,81% superior aos 30,03 g estimados na ausência de boro. Sob a lâmina de 100%, o máximo estimado foi de 45,58 g, obtido com 1,16 g planta⁻¹, representando incremento de 38,11% em relação aos 33,00 g estimados na dose zero.

Na lâmina de 50%, o ponto de máximo foi estimado em 1,15 g planta⁻¹, correspondendo a 106,63 g de massa seca do colmo (Figura 2D). Comparativamente aos 83,13 g estimados na ausência de boro, o incremento foi de 28,27%. Sob a lâmina de 100%, a máxima resposta foi estimada em 117,21 g, na dose de 1,27 g planta⁻¹, representando incremento de 40,45% em relação aos 83,45 g estimados na dose zero. Assim, a maior disponibilidade hídrica elevou a

massa máxima do colmo e deslocou o ponto de máximo para uma dose ligeiramente superior de boro.

5 DISCUSSÃO

A produção de biomassa vegetativa e de grãos foi condicionada pela interação entre a disponibilidade hídrica e as doses de boro. A reposição correspondente a 100% da capacidade de campo proporcionou maior acúmulo de biomassa e melhor desempenho produtivo, indicando que a adequada disponibilidade de água favoreceu a expressão da resposta das plantas à adubação boratada. Esse resultado pode estar relacionado à manutenção da atividade fotossintética, do fluxo transpiratório e do transporte de nutrientes no xilema, processos diretamente afetados pelo déficit hídrico. As respostas quadráticas demonstraram que o incremento no fornecimento de B foi benéfico até uma faixa ótima, acima da qual ocorreram estabilização ou redução das variáveis, evidenciando o caráter não linear da resposta do milho a esse micronutriente.

Considerando conjuntamente as variáveis de biomassa e produção, os vértices dos modelos ajustados concentraram-se entre 1,15 e 1,30 g planta⁻¹ de B. Para as características que apresentaram interação significativa, as doses de máxima resposta variaram entre 1,05 e 1,22 g planta⁻¹ sob reposição de 50% e entre 1,09 e 1,27 g planta⁻¹ sob 100% da capacidade de campo. A sobreposição entre essas faixas indica que a disponibilidade hídrica modificou principalmente a magnitude da resposta, e não necessariamente a localização do ponto ótimo. Assim, embora doses intermediárias de B tenham favorecido o desempenho das plantas em ambas as condições, os maiores valores absolutos foram observados sob adequada reposição hídrica.

A resposta observada apresenta coerência com a função fisiológica do B na integridade da parede celular, no funcionamento das membranas e nos processos de divisão e alongamento celular. Sob déficit hídrico, a redução do fluxo de água no sistema solo-planta pode limitar a aquisição e o transporte do micronutriente, intensificando restrições metabólicas e estruturais. Naeem et al. (2018) demonstraram que o déficit hídrico reduziu o crescimento e o estado nutricional do milho, enquanto a aplicação foliar de B contribuiu para a manutenção do estado hídrico, da capacidade fotossintética e do sistema de defesa antioxidante. Esses mecanismos ajudam a explicar por que o fornecimento adequado de B, no presente estudo, atenuou parte das perdas ocasionadas pela menor disponibilidade de água.

De forma complementar, Li et al. (2025) verificaram que o estresse hídrico comprometeu características agronômicas, o acúmulo de matéria seca e a eficiência de uso da

radiação em diferentes genótipos de milho, embora parte desses efeitos tenha sido reduzida pela manutenção de resíduos vegetais no solo. Em conjunto, essas evidências indicam que a redução da biomassa e da produção de grãos sob 50% da capacidade de campo resulta de limitações integradas sobre expansão celular, assimilação de carbono e aquisição de nutrientes. Entretanto, os resultados do presente estudo também demonstram que o B não substitui o manejo hídrico adequado: mesmo nas doses de maior eficiência, o desempenho sob déficit hídrico permaneceu inferior ao observado em plantas mantidas próximas à capacidade de campo. Portanto, a contribuição do micronutriente deve ser interpretada como uma mitigação parcial do estresse, e não como recuperação completa do potencial produtivo.

A redução do desempenho nas doses superiores confirma que o manejo do B é limitado por uma estreita faixa entre deficiência, suficiência e toxicidade. Em milho cultivado em Latossolo argiloso, Prado et al. (2026) observaram resposta quadrática à aplicação de ulexita, com produtividade máxima estimada em aproximadamente 31 kg B ha⁻¹. Doses excessivas, entretanto, reduziram o teor de clorofila, o balanço de nitrogênio, a atividade fotossintética e a produtividade, além de provocarem sintomas visuais de toxicidade. Konuşkan et al. (2025) também verificaram que a combinação de 9 kg B ha⁻¹ no solo com 3 kg B ha⁻¹ por via foliar favoreceu a composição mineral e a qualidade nutricional dos grãos, enquanto o aumento adicional das doses não proporcionou benefícios equivalentes. Esses resultados sustentam a existência de um intervalo ótimo de fornecimento, acima do qual a absorção excessiva de B pode comprometer processos fisiológicos e produtivos.

As diferenças entre as doses ótimas relatadas na literatura e aquelas estimadas no presente estudo devem ser interpretadas considerando a fonte do fertilizante, a forma de aplicação, o volume de solo explorado pelas raízes, a textura e o teor inicial de B no solo, o estágio fenológico e a disponibilidade hídrica. Particularmente, doses expressas em g planta⁻¹ em vasos não podem ser convertidas diretamente em recomendações de kg ha⁻¹ para condições de campo. Ainda assim, a convergência das respostas em doses intermediárias demonstra que o fornecimento equilibrado de B pode aumentar a eficiência produtiva do milho e reduzir parcialmente os efeitos do déficit hídrico. Dessa forma, a manutenção da umidade próxima à capacidade de campo, associada ao fornecimento de B dentro da faixa de suficiência, constitui a estratégia mais eficiente para maximizar o crescimento e a produção, enquanto aplicações excessivas devem ser evitadas devido ao elevado risco de toxicidade.

6 CONCLUSÕES

A reposição hídrica correspondente a 100% da capacidade de campo proporcionou melhor desempenho agrônômico do milho, favorecendo o crescimento, o acúmulo de biomassa e os componentes de produção. As respostas às doses de boro foram predominantemente quadráticas, com melhor desempenho em doses intermediárias, concentradas, de modo geral, em torno de 1,09 a 1,30 g planta⁻¹. A interação entre os fatores demonstrou que a disponibilidade hídrica modifica a magnitude da resposta à adubação boratada. Assim, o manejo integrado da água e do boro é fundamental para maximizar o desempenho da cultura e evitar reduções associadas ao déficit hídrico ou ao excesso do micronutriente.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHAW, O. W.; DANSO-BOATENG, E. Fertilizer technology. In: ACHAW, O. W.; DANSO-BOATENG, E. **Chemical and process industries: with examples of industries in Ghana**. Cham: Springer, 2021. p. 107–133. DOI: 10.1007/978-3-030-79139-1_4. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-79139-1_4. Acesso em: 23 ago. 2026.
- ANDRADE, V. C. S. **Política nacional de biocombustíveis: da criação à implementação do renovabio no município de Uberaba/MG**. Tese de Doutorado. Instituto de Geografia – IGUFU – Universidade Federal de Uberlândia, 2025. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2025.5028>
- BARBOSA, J. P. P. L. **Adubação potássica em diferentes doses e formas de aplicação: Efeitos na emergência e vigor do milho**. 2023. 22 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 2023.
- BEHERA, B.; KANCHETI, M.; RAZA, M. B.; SHIV, A.; MANGAL, V.; RATHOD, G.; ALTAF, M. A.; KUMAR, A.; AFTAB, T.; KUMAR, R.; TIWARI, R. K.; SINGH, B. Mechanistic insight on boron-mediated toxicity in plant vis-à-vis its mitigation strategies: a review. **International Journal of Phytoremediation**, v. 25, n. 1, p. 9–26, 2023. DOI: 10.1080/15226514.2022.2049694. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2049694>. Acesso em: 23 ago. 2026.
- BIENERT, M. D.; JUNKER, A.; MELZER, M.; ALTMANN, T. VON WIRÉN, N.; BIENERT, G. P. Boron deficiency responses in maize (*Zea mays* L.) roots. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.1, n.1, p.1-15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.202300173>
- CAMPOS, A. J. M.; SANTOS, S. M.; NACARATH, I. R. F. F. Estresse hídrico em plantas: uma revisão. **Research, Society and Development**, v.10, n.15, 7 p. e311101523155, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/23155>. Acesso em: 27 mai. 2026.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Brasília, DF, v. 13, safra 2025/26, n. 9, nono levantamento, jun. 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/conab>. Acesso em: 17 jun. 2026.
- CONTINI, E.; MOTA, M. M.; MARRA, R.; BORGHI, E.; MIRANDA, R. A.; FERREIRA, A.; SILVA, D. D.; MACHADO, J. R. A.; COTA, L. V.; COSTA, R. V.; MENDES, S. M. **Milho: caracterização e desafios tecnológicos**. Brasília: Embrapa. (Desafios do Agronegócio Brasileiro, 2), 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/195075/1/Milho-caracterizacao.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2026.
- CRUZ, S. J. S.; COSTA JÚNIOR, J. R.; OLIVEIRA, S. S. C.; PONCIANO, V. F. G.; VALICHESKI, R. R. Aplicação de fertilizantes com boro e zinco em culturas de milho em um quartzito lítico. **Revista Caatinga**, v.35, n.4, p.848-856, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n412rc>

FAGAN, E. B.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D.; SOARES, L. H.; DOURADO NETO, D. **Fisiologia vegetal: metabolismo e nutrição mineral**. São Paulo: Andrei Editora, 2016.

FUJIYAMA, B. S. **Boro melhora a fotossíntese, alivia os danos da restrição hídrica, promove o crescimento e produtividade em soja**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 68 f. 2019.

GUIMARÃES, P. S.; ROCHA, D. S.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z. Conteúdo de carboidrato foliar em híbridos de milho submetidos à restrição hídrica. **Evidencia, Joacaba**, v. 19, n. 2, p. 93-112, 2019. DOI: <https://doi.org/10.18593/eba.v19i1.20201>

HUSSAIN, H. A.; MEN, S.; HUSSAIN, S. Interactive effects of drought and heat stresses on morpho-physiological attributes, yield, nutrient uptake and oxidative status in maize hybrids. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 3890, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40362-7>

KONUŞKAN, Ö.; YALÇIN, M.; KONUŞKAN, D. B.; IQBAL, M. A.; DITTA, A.; SOUFAN, W.; EL SABAGH, A. Boron soil-foliage fertilization improves the nutritional quality of maize grains. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 34, n. 5, p. 5627–5637, 2025. DOI: [10.15244/pjoes/191499](https://doi.org/10.15244/pjoes/191499). Disponível em: <https://doi.org/10.15244/pjoes/191499>. Acesso em: 23 ago. 2026.

LI, Y.; SUN, J.; LIU, J.; YUAN, Z.; HU, S.; LI, X.; WANG, Y.; SUN, C.; DU, J.; JI, W.; LI, J.; FAN, G.; WANG, Z.; CAO, G. Straw returning to the field alleviates drought stress in maize by enhancing radiation use efficiency to promote agronomic character and dry matter accumulation. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 23, art. 102243, 2025. DOI: [10.1016/j.jafr.2025.102243](https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102243). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102243>. Acesso em: 23 ago. 2026.

MORAIS, T. P.; BRITO, C. H.; FERREIRA, A. S.; LUZ, J. M. Q. Aspectos morfofisiológicos de plantas de milho e bioquímico do solo em resposta à adubação nitrogenada e à inoculação com *Azospirillum brasilense*. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 62, n. 6, p. 507-509, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562060012>

NAEEM, M.; NAEEM, M. S.; AHMAD, R.; AHMAD, R.; ASHRAF, M. Y.; IHSAN, M. Z.; NAWAZ, F.; ATHAR, H.-U.-R.; ASHRAF, M.; ABBAS, H. T.; ABDULLAH, M. Improving drought tolerance in maize by foliar application of boron: water status, antioxidative defense and photosynthetic capacity. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 5, p. 626–639, 2018. DOI: [10.1080/03650340.2017.1370541](https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1370541). Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1370541>. Acesso em: 23 ago. 2026.

OLDONI, F. C. A. **Manejo da fertilização boratada na incidência da desordem fisiológica, produção e qualidade de frutos de manga cv. palmer**. 2016. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro, Juazeiro, BA.

PRADO, R. de M.; COTRIM, M. F.; SANTOS, J. V. da S.; SILVA, A. C. da; CAMPOS, C. N. S.; ROCHA, A. M. S.; PRADO, E. R. Boron toxicity thresholds in field-grown maize fertilized with ulexite incorporated into a clayey Oxisol. **Scientific Reports**, 2026. Publicação

online antecipada. DOI: 10.1038/s41598-026-63181-z. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-026-63181-z>. Acesso em: 23 ago. 2026.

RAHMAN, N.; SCHOENAU, J. Bioavailability, Speciation, and Crop Responses to Copper, Zinc, and Boron Fertilization in South-Central Saskatchewan Soil. **Agronomy**, v.12, n.8, 1837, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12081837>

SAFDAR, M. E.; QAMAR, R.; JAVED, A.; NADEEM, M. A.; JAVEED, H. M. R.; FAROOQ, S.; GŁOWACKA, A.; MICHAŁEK, S.; ALWAHIBI, M. S.; ELSHIKH, M. S.; AHMED, M. A. A. Combined application of boron and zinc improves seed and oil yields and oil quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.). **Agronomy**, v. 13, n. 8, art. 2020, 2023. DOI: 10.3390/agronomy13082020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13082020>. Acesso em: 23 ago. 2026.

SALDANHA, C. B.; EMRICH, E. B.; NEGRÃO, E. N. M.; CASTIONI, G. A. F. **Ciência do solo: fertilidade do solo e nutrição mineral de plantas**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S. A., 2016.

SANGOI, L.; SCHWEITZER, C.; SILVA, P. R. F. da; SCHMITT, A.; VARGAS, V. P.; CASA, R. T.; SOUZA, C. A. de. Perfilamento, área foliar e produtividade do milho sob diferentes arranjos espaciais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 6, p. 609–616, 2011. DOI: 10.1590/S0100-204X2011000600006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000600006>. Acesso em: 23 ago. 2026.

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; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 23 ago. 2026.

SELEIMAN, M. F.; AL-SUHAIBANI, N.; ALI, N.; AKMAL, M.; ALOTAIBI, M.; REFAY, Y.; DINDAROGLU, T.; ABDUL-WAJID, H. H.; BATTAGLIA, M. L. Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. **Plants**, v.10, n.2, art. 259, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10020259>

SILVA, L. E. B.; DE SALES SILVA, J. C.; DE SOUZA, W. C. L.; LIMA, L. L. C.; DOS SANTOS, R. L. V. Desenvolvimento da cultura do milho (*Zea mays* L.): revisão de literatura. **Diversitas Journal**, v. 5, n. 3, p. 1636-1657, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v5i3-869>

SILVA, S.; PAZ SOUSA, A. C.; SILVA, C. S.; ARAÚJO, E. R.; SILVA, S. M. A.; TEODORO, I. Parâmetros produtivos do milho sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas no semiárido brasileiro. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 30-41, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v1n1p30-41>

SILVA, T. A.; COSTA, R. C. A.; PELÁ, A.; PELÁ, M. G. **Épocas e formas de aplicação de boro na soja em plantio direto**. II CONGRESSO DE ENSINO PESQUISA E EXTENSÃO DA UEG. Anais... Pirenópolis. Outubro. 2015. Disponível em: <https://www.anais.ueg.br/index.php/cepe/article/view/5246>. Acesso em: 27 jun. 2026.

SOUZA, R. B. **Volatilização de amônia e rendimento do milho com uso de fertilizantes nitrogenados**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Agrônômica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Eds). (2004). Cerrado: Soil Correction and Fertilization. 2. ed. Brasília: Embrapa Technological Information/Embrapa-CPA.

SUN, H.; SHI, Q.; LIU, N. Y.; ZHANG, S. B.; HUANG, W. Drought stress delays photosynthetic induction and accelerates photoinhibition under short-term fluctuating light in tomato. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.196, p.152–161, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.01.044>

TAO, L.; CHEN, T. Special Issue “Plant Responses to Abiotic and Biotic Stresses”. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 26, n.19, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms26199651>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed. téc.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 23 ago. 2026.

TEJEDA, L. H. C. **Déficit hídrico em plântulas de milho: aspectos morfológicos e moleculares**. 74f. 2019. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

VELJKOVIĆ, V. B.; BIBERDŽIĆ, M. O.; BANKOVIĆ-ILIĆ, I. B. Biodiesel production from corn oil: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 531–548, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.024>

YIN, Y.; GAO, Y.; LIN, D.; WANG, L.; MA, W.; WANG, J. A. Mapeamento do risco de seca do milho em escala global sob mudanças climáticas com base no modelo GEPIC-Vulnerabilidade-Risco. **International Journal of Disaster Risk Science**, v.12, n.3, p.428–442, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00349-3>

ZANCANARI, N. S. **Anatomia e morfologia de plantas de milho com diferentes números de alelos transgênicos**. 64 f. 2019. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.

ZHAO, Q.-Y.; XU, S.-J.; ZHANG, W.-S.; ZHANG, Z.; YAO, Z.; CHEN, X.-P.; ZOU, C.-Q. Identifying key drivers for geospatial variation of grain micronutrient concentrations in major maize production regions of China. **Environmental Pollution**, v. 266, pt. 2, art. 115114, 2020. DOI: [10.1016/j.envpol.2020.115114](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115114). Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115114>. Acesso em: 23 ago. 2026.