

MARCOS ANDRÉ MENEZES MOURA

**Boro no solo e na planta: uma revisão sobre desafios de manejo e impactos na
disponibilidade**

São Cristóvão – SE

Fevereiro de 2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE – UFS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS APLICADAS – CCAA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA – DEA

**BORO NO SOLO E NA PLANTA: UMA REVISÃO SOBRE DESAFIOS DE MANEJO
E IMPACTOS NA DISPONIBILIDADE**

**Monografia apresentada ao Departamento de
Engenharia Agrônômica – Universidade Federal
de Sergipe, como requisito parcial para obtenção
do título de Engenheiro Agrônomo.**

APROVADO em:

ORIENTADO: Marcos André Menezes Moura

Prof. Dr Aline De Almeida Vasconcelos
(Orientador)

Mestre Michel Antoni da Silva
(Banca examinadora)

Mestre Willian Gonçalves Souza
(Banca examinadora)

Dedico, primeiramente, a Deus por guiar meus pensamentos. À minha família, por ser meu alicerce. Sem vocês, nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder o dom da vida e guiar meus pensamentos. Aos meus pais Raimundo e Cristina, por todo o esforço que fizeram para minha educação e desenvolvimento, apoio incondicional e por me incentivarem a seguir meus sonhos. Ao meu pai, agradeço por nunca medir esforços para nos proporcionar o melhor e pelo exemplo de honestidade e responsabilidade. A minha mãe, agradeço por sempre cobrar o melhor de mim e não deixar eu desanimar com as adversidades. Sem o amor e o apoio de vocês, eu não teria chegado até aqui.

Agradeço a minha irmã Sarah, por desde sempre estar comigo, que apesar das idas e vindas da vida, está ao meu lado me dando força para enfrentar as barreiras da vida.

Aos amigos que fiz durante a minha graduação, Amanda Matos, Domingos Neto, Felipe Mota, Felipe Santana, Gustavo Ryan, José Henrique, Maria Gabriela, Priscila do Carmo, Ryan Eduardo, Thiago Andrade, Victor França e Vinicius Santana, pela colaboração, apoio e amizade durante toda a trajetória deste trabalho. A contribuição de cada um foi fundamental para o meu desenvolvimento pessoal e acadêmico, e sou imensamente grato a todos.

À minha noiva, Lorena, agradeço por compartilhar a vida comigo, por nossas inúmeras conversas que foram base para muitas tomadas de decisão nesse período, obrigado por me ensinar a ser diferente e a melhorar um pouco a cada dia, além de companheira você foi amiga, dividindo momentos bons e outros de maior reflexão. Agradeço também, o meu sogro Rosival, minha sogra Denise e meus cunhados Phelipe, Joanna e Victoria que me acolheram em sua família de braços abertos, e que tenho máximo respeito e admiração.

À minha orientadora, Professora Aline de Almeida Vasconcelos, pela orientação precisa, paciência e por sempre me incentivar a buscar o melhor no desenvolvimento deste trabalho. Por ser alguém acessível para os estudantes e que desde o primeiro diálogo demonstrou que professores e estudantes juntos podem ir mais longe. Sua dedicação foi essencial para a conclusão deste TCC.

Por fim, agradeço a todos os professores e colaboradores da Universidade Federal de Sergipe, que com seu ensinamento e dedicação, me proporcionaram a oportunidade de aprender e me desenvolver ao longo do curso.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1 Dinâmica de boro no solo	10
2.2 Deficiência e toxicidade do boro	15
2.3 Absorção de boro - interação Boro x solo x raiz	18
2.4 Mecanismos para absorção do ácido bórico	21
2.5 Mobilidade do Boro nas plantas	22
2.6 Funções reprodutivas	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1 Protocolo de investigação	25
3.2 Estratégia de busca e descritores	25
3.3 Critérios de inclusão e exclusão	27
3.4 Extração, organização e análise dos dados	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 Síntese crítica das obras: pontos convergentes e divergentes	28
4.2 Dinâmica do boro no solo: convergências conceituais	29
4.3 Fatores Edafoclimáticos e Disponibilidade de Boro	29
4.4 Deficiência e Toxicidade de Boro: Desafios e Impactos nas Plantas	30
4.5 Manejo de Boro e Estratégias de Fertilização	30
5 CONCLUSÕES	31
REFERÊNCIAS	32

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Influência do pH do solo na disponibilidade de macro e micronutrientes. 12
- Figura 2: Plantas com boro adequado (+B) apresentam desenvolvimento radicular e germinal significativamente mais robusto em comparação com aquelas cultivadas em condições deficientes em boro (-B). 19
- Figura 3: Visão geral dos transportadores de Boro em plantas. 22
- Figura 4: Exemplificação de uma busca com a palavra “boro” em dois idiomas na base de dados Google Scholar. 27

RESUMO

A nutrição das plantas é essencial para o desenvolvimento das culturas agrícolas, sendo o boro um micronutriente indispensável para a produtividade. Este estudo tem como objetivo analisar o comportamento do boro no solo e os mecanismos de absorção pelas plantas, com ênfase na identificação das causas que tornam o manejo do boro complexo. O boro desempenha papel crucial no suporte estrutural da parede celular, divisão celular, transporte de açúcares, germinação dos grãos de pólen e granação. A deficiência de boro é comum em solos de mais de 80 países, sendo um problema nutricional significativo. A disponibilidade de boro é influenciada por fatores edafoclimáticos, como pH, textura do solo e matéria orgânica. O manejo do boro é desafiador devido à sua estreita faixa entre deficiência e toxicidade e sua alta mobilidade no solo. A fertilização e a correção da acidez do solo são estratégias cruciais para otimizar a disponibilidade de boro. Este trabalho integra estudos sobre a dinâmica de boro no solo e a absorção pelas plantas, propondo soluções para o manejo eficiente desse nutriente.

Palavras-chave: mobilidade, textura, fertilização, deficiência, toxicidade, disponibilidade.

1 INTRODUÇÃO

A nutrição das plantas por meio de elementos minerais é crucial para o desenvolvimento e crescimento das culturas agrícolas e para obtenção de altas produtividades que atendam à demanda do mercado consumidor. Micronutrientes são elementos essenciais à planta e quantitativamente são demandados em pequenas quantidades (mg por quilo de matéria seca de tecido vegetal) quando comparado aos macronutrientes (g por quilo de matéria seca de tecido vegetal). Dentre os micronutrientes, o boro é o que tem maior complexidade no diagnóstico de disponibilidade, dinâmica no solo e planta e manejo no fornecimento dentro de uma estratégia de adubação.

Na agricultura, o consumo de boro tem apresentado crescimento contínuo, refletindo-se também no aumento da produção de fertilizantes, que constitui o segundo principal destino dos produtos à base de boro ficando atrás somente da produção de vidros e cerâmicas. A essencialidade desse elemento é estabelecida com base em critérios relacionados às suas funções vitais, aos ciclos fisiológicos, à manifestação de sintomas de deficiência e aos processos metabólicos das culturas. O boro é reconhecido por desempenhar papel crucial no suporte estrutural da parede celular dos vegetais, e na manutenção da integridade funcional em diversos processos metabólicos. Ademais, está envolvido na divisão celular, no transporte de açúcares, germinação dos grãos de pólen, alongamento do tubo polínico e granação, etapas decisivas para o sucesso reprodutivo e produtividade das culturas.

A disponibilidade de boro para as plantas está condicionada às características edafoclimáticas, variando conforme o ambiente de cultivo. Embora a matéria orgânica do solo representa um dos principais reservatórios desse micronutriente, sua utilização restringe-se a um indicador indireto da disponibilidade, uma vez que a liberação do boro para a solução do solo ocorre principalmente durante os processos de mineralização. Parte do boro encontra-se associada às frações minerais do solo, especialmente argilas e óxidos, enquanto outra permanece complexada à matéria orgânica. No contexto agrícola, o manejo do boro é considerado complexo, devido à estreita faixa entre deficiência e toxicidade, à sua elevada mobilidade no solo, à baixa ou inexistente mobilidade na planta e à forte influência de fatores como pH e condições climáticas sobre sua disponibilidade.

Nesse cenário, o uso adequado do boro é fundamental para garantir a segurança alimentar global, e a sustentabilidade da produção agrícola, sendo crucial para otimizar os recursos naturais e atender à crescente demanda por alimentos. Sua deficiência, presente em solos de mais de 80 países, compromete a qualidade e o rendimento das colheitas. No Brasil,

estudos mostram que a deficiência de boro é um dos problemas nutricionais mais recorrentes em solos agrícolas. De acordo com pesquisas conduzidas pelo Instituto Agronômico de Campinas (IAC), aproximadamente 89% dos solos brasileiros apresentam teores de boro considerados baixos ou médios, com 60% das amostras do Cerrado apresentando níveis muito baixos de boro ($<0,2 \text{ mg/dm}^3$).

Assim, este trabalho teve como objetivo analisar a dinâmica do boro no solo e os mecanismos de absorção pelas plantas, avaliando sua disponibilidade e funções fisiológicas, com ênfase na identificação de causas da complexidade do uso do boro na agricultura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico baseia-se na dinâmica do boro no solo, mecanismos de absorção da planta, e funções do boro nas culturas.

2.1 Dinâmica de boro no solo

A dinâmica do boro no solo é influenciada por diversos fatores químicos e físicos do ambiente edáfico, sendo crucial o conhecimento detalhado sobre as fontes desse micronutriente, os fatores que influenciam sua disponibilidade, suas diferentes frações no solo e seus comportamentos cinéticos, visando assistir corretamente a cultura e suprir suas necessidades (Das; Purkait, 2020).

A especiação química do boro no solo compreende diferentes frações, incluindo o boro em solução na forma de ácido bórico e borato, o boro associado à matéria orgânica dissolvida e aquele adsorvido às superfícies de minerais argilosos, óxidos e ácidos húmicos sólidos (Van Eynde; Weng; Comans, 2020).

A interação do boro entre as fases sólida e solução é um processo de equilíbrio dinâmico, no qual o nutriente transita entre ficar retido nos minerais e na matéria orgânica (estoque) ou dissolvido na água do solo (disponível para a planta), sendo esse movimento controlado principalmente pelo pH, que determina se o boro ficará mais "preso" à terra ou livre para ser absorvido ou lixiviado (Zhou *et al.*, 2025). Estudos como o de Perkins (1995) foram desenvolvidos para calcular a concentração de boro na solução e na fase sólida do solo, dependendo do conteúdo de água presente. Quando há mais água no solo, o boro tende a se mover mais facilmente na solução, o que altera o equilíbrio entre as duas formas.

Quando o pH do solo é inferior a 7,0 a forma predominante de boro é $[B(OH)_3]$, que tem uma afinidade relativamente baixa com as partículas de argila. No entanto, em condições de pH mais alcalino, a quantidade de borato aumenta consideravelmente, atingindo o pico de adsorção por volta de pH 9,0 (Elrashidi e O'Connor, 1982). Solos de textura leve apresentam menor capacidade de retenção de boro, em função do reduzido teor de argila e matéria orgânica, o que favorece a lixiviação do micronutriente e aumenta o risco de deficiência para as plantas (Sarkis *et al.*, 2024).

Mesmo em solos de textura argilosa, o boro pode ser facilmente perdido por lixiviação, em razão de sua ocorrência predominante na solução do solo na forma de ácido bórico (H_3BO_3), espécie eletricamente neutra, que não é retida pela capacidade de troca catiônica e aniônica do solo, favorecendo sua mobilidade no perfil (Sá; Ernani, 2016)

A mobilidade de boro em solos agrícolas sob regimes de lixiviação controlada foi geralmente baixa, apesar da adição de matéria orgânica; contudo, a movimentação no perfil, associada à solução do solo, foi observada, ocorrendo principalmente por fluxo convectivo da água percolante ao longo dos macroporos e canais estruturais, sendo favorecida por maiores teores de umidade e pela presença de agregados menos estáveis, e mostrando-se dependente das condições de umidade e da estrutura do solo (JORDÁN *et al.*, 2023).

A quantidade total de B é maior em solos argilosos, mas sua disponibilidade para as plantas pode ser baixa nestes solos devido à resistência que mantém o B nas superfícies da argila (Galán *et al.*, 2008).

Devido a essa alta mobilidade no solo, a determinação do boro em análise do solo é bastante questionada quando realizada com bastante antecedência. A determinação desse micronutriente por meio de análise química pode apresentar limitações quando realizada com grande antecedência em relação ao período de cultivo, pois seus teores podem sofrer variações ao longo do tempo em função de processos de lixiviação e dinâmica da solução do solo; Estudos demonstram que o comportamento de lixiviação do boro é influenciado por fatores como a fonte do nutriente aplicada, a textura do solo, o teor de matéria orgânica e as condições de umidade, com perdas significativas observadas em experimentos de percolação sob diferentes condições edafoclimáticas (Silva *et al.*, 2021; Gupta, 1993; Dhassi *et al.*, 2019; Sarkis *et al.*, 2024).

A determinação da disponibilidade de boro no solo é realizada por meio de métodos químicos de extração que visam estimar a fração de boro que pode estar acessível às plantas. O extrator mais tradicional e amplamente utilizado é a extração com água quente, em que o solo é fervido com água para solubilizar o boro presente nas frações facilmente solúveis e trocáveis; esse procedimento visa simular a fração de boro que as plantas podem absorver, embora seja reconhecido por ser trabalhoso e de eficiência variável em função das condições de extração (tempo de fervura, uniformidade, evaporação), o que pode influenciar a precisão dos resultados laboratoriais (Marupaka *et al.*, 2022)

Além da água quente, soluções de cloreto de cálcio (CaCl_2) estão entre os extratores empregados, muitas vezes em combinação com manitol, que forma complexos com o boro e pode aumentar a eficiência da extração em determinados tipos de solo, constituindo alternativa viável para estimar a fração potencialmente disponível às plantas (Marupaka *et al.*, 2022).

Trabalhos comparativos demonstram que métodos como Mehlich-1 e Mehlich-3, originalmente desenvolvidos para a extração simultânea de múltiplos nutrientes, também extraem o boro e podem correlacionar-se significativamente com o boro extraído por água quente, apresentando relação linear positiva entre os teores obtidos pelos diferentes extratores. Essa correlação indica que, embora os valores absolutos possam variar entre métodos, a tendência de resposta à disponibilidade do nutriente é semelhante, permitindo sua utilização como alternativa mais prática em análises de rotina com grande número de amostras (Marupaka et al., 2022).

Estudos experimentais confirmam que diferentes extratores variam em sua capacidade de recuperar boro do solo. Em ensaios com solos agrícolas, observou-se que a extração por água quente, HCl diluído e extratores como Mehlich-1 e Mehlich-3 resultam em teores de boro extraído que aumentam linearmente com a adição de boro ao solo, indicando que tais métodos são capazes de refletir parte da disponibilidade do nutriente, embora com diferenças quantitativas entre si (Oliveira Neto *et al.*, 2009).

O estudo de sua adsorção no solo tem se concentrado na matéria orgânica, minerais de argila, óxidos de alumínio e ferro pouco cristalinos e cristalinos, que atuam como superfícies reativas responsáveis pela retenção do boro no solo (Van Eynde; Weng; Comans, 2020). Regularmente, mostra-se que a adsorção de B nessas superfícies reativas minerais e orgânicas aumenta com o aumento do pH, e sua adsorção máxima ocorre em valores de pH entre 8 e 10, acima desse valor a adsorção tende a diminuir (Van Eynde; Weng; Comans, 2020). Em solos ácidos de regiões tropicais úmidas, os óxidos exercem papel predominante na adsorção de B, enquanto em solos temperados e com pH mais alto a matéria orgânica assume maior relevância. Em solos com pH (CaCl_2) inferior a 6, a interação do boro reativo natural com a fase sólida é considerada limitada (Van Eynde; Weng; Comans, 2020).

O pH da solução do solo exerce papel determinante nos processos de adsorção do boro, e diferentes condições de acidez ou alcalinidade modificam sua solubilidade e disponibilidade para as plantas (Smith *et al.*, 2013). De forma complementar, a influência do pH sobre a disponibilidade dos nutrientes no solo, incluindo o boro, é apresentada na Figura 1, evidenciando as faixas de maior e menor disponibilidade em função das variações de acidez e alcalinidade.

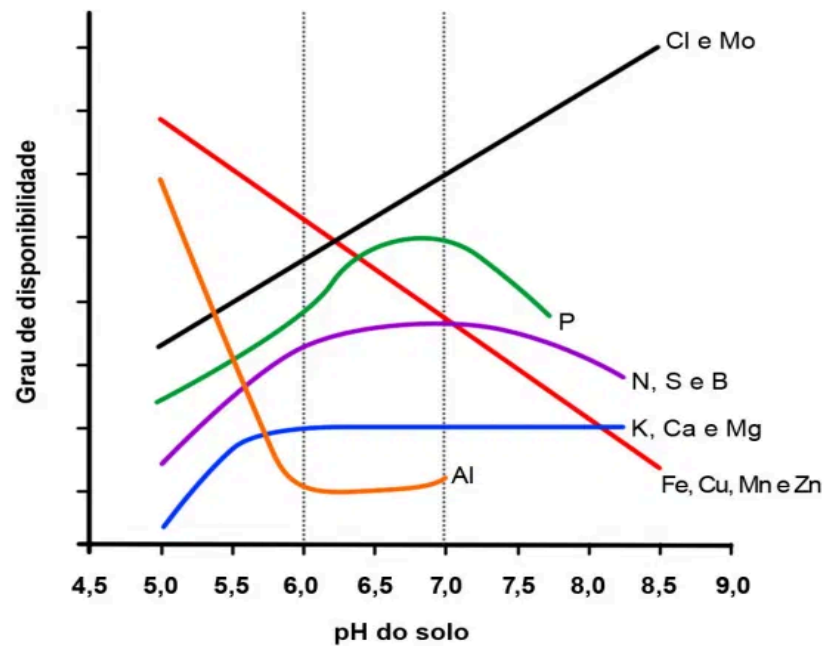


Figura 1. Influência do pH do solo na disponibilidade de macro e micronutrientes. Fonte: Adaptado de Malavolta (1980).

Observa-se que em valores de pH entre 6 e 7 a disponibilidade do boro tende a ser maior, enquanto em condições de pH mais extremas ocorre redução de sua disponibilidade. Esse comportamento evidencia a importância do manejo adequado do pH para garantir a eficiência do fornecimento de boro às plantas.

Estudos que avaliam essa relação frequentemente utilizam soluções extratoras como o CaCl_2 , que simula a dinâmica iônica no solo. A concentração de boro é determinada em função do pH ajustado com ácidos ou bases, sendo que, em condições mais ácidas, a solubilidade do boro tende a aumentar, enquanto em pH mais alcalino, a solubilidade pode ser reduzida devido à formação de compostos menos solúveis (Sahu *et al.*, 2024).

Em solos com pH levemente ácido, condição frequente em ambientes agrícolas o boro ocorre predominantemente na forma de ácido bórico não dissociado (BA) (H_3BO_3), que é facilmente lixiviado pela chuva devido à sua alta solubilidade (Landi *et al.*, 2019) e por ser de espécie eletricamente neutra, não iônica. O ácido bórico é formado pela reação do óxido de boro (B_2O_3) com água. Por outro lado, em solos alcalinos, o ácido bórico pode reagir com íons hidroxila, originando a forma aniônica tetrahidroxiborato ($\text{B}(\text{OH})_4^-$) que tende a apresentar maior capacidade de adsorção às partículas do solo, o que reduz sua disponibilidade para as plantas (Sahu *et al.*, 2024).

Em solos ácidos, o boro apresenta reservas baixas e uma capacidade limitada de liberação. Sua liberação é inicialmente rápida, com mais de 70% do boro sendo liberado na forma de frações facilmente absorvíveis, seguida de uma liberação mais lenta. A aplicação de corretivos de acidez, como o calcário e o gesso agrícola, altera significativamente as propriedades químicas dos solos, incluindo o pH e a disponibilidade de cátions trocáveis, o que pode impactar a dinâmica de micronutrientes como o boro. Estudos mostram que a adição de calcário e gesso melhora as condições de pH e concentrações de cálcio e magnésio do solo, influenciando o balanço químico geral do perfil edáfico (Faria *et al.*, 2013).

Em experimentos de lixiviação, solos corrigidos com calcário apresentaram menores concentrações de boro na solução em comparação com solos ácidos não corrigidos, indicando que a correção da acidez pode reduzir a lixiviação e alterar a disponibilidade de boro para as plantas (Soares *et al.*, 2013).

Adicionalmente, a aplicação de corretivos da acidez pode favorecer a precipitação de ferro e alumínio trocáveis na forma de óxidos e hidróxidos, os quais atuam como superfícies reativas para a adsorção de boro, promovendo, conseqüentemente, o aumento dos teores de boro extraível no solo (Sarkar *et al.*, 2015).

Os princípios de sorção também são empregados na compreensão, no manejo e na previsão dos processos físicos do solo, que implica na disponibilidade de todos os nutrientes, como a agregação e a dispersão das partículas, os quais regulam a suscetibilidade à erosão e os fluxos hídricos no solo, incluindo a infiltração e a capacidade de retenção de água (Strawn, 2021).

A matéria orgânica desempenha um papel crucial na adsorção do boro, afetando sua concentração na solução do solo e a disponibilidade desse micronutriente para as plantas (Goldberg; Suarez, 2012).

Altos teores de matéria orgânica no solo podem reduzir temporariamente a disponibilidade de boro na solução do solo (Yermiyahu *et al.*, 2001), mas ao mesmo tempo aumenta sua biodisponibilidade (Dhassi *et al.*, 2019) e diminuem sua lixiviação (Das *et al.*, 2019).

A histerese na adsorção e dessorção de boro no solo refere-se ao fenômeno em que a quantidade de boro adsorvida pelas partículas do solo durante a adição do nutriente é diferente da quantidade liberada durante a dessorção, ou seja, os processos de adsorção e liberação não seguem o mesmo caminho. Esse efeito é influenciado pelo teor de matéria orgânica, que aumenta a retenção do boro, formando complexos mais estáveis e dificultando sua desorção,

acentuando a diferença entre os processos de adsorção e desorção e reduzindo a disponibilidade imediata do micronutriente para as plantas (Golberg; Suarez, 2012). Em solos com maior quantidade de matéria orgânica, o boro tende a ser mais fortemente adsorvido, formando complexos que retardam sua liberação. Esse fenômeno é mais pronunciado em solos ácidos, onde a capacidade de adsorção do boro é mais intensa. Em contrapartida, solos com menor matéria orgânica apresentam menor histerese e maior disponibilidade de boro.

Como o boro ocorre no solo predominantemente na forma aniônica em pH mais elevado ou como ácido bórico sem carga específica em condições mais ácidas, comuns em solos tropicais, esse micronutriente apresenta elevada mobilidade, uma vez que não é eficientemente adsorvido pelas cargas negativas da argila e da matéria orgânica, sendo facilmente transportado para camadas mais profundas do solo por lixiviação (Goldberg, 1997; Alleoni; Camargo, 2000; Landi *et al.*, 2019).

A textura do solo, o conteúdo de matéria orgânica e o tipo de fertilizante utilizado foram apontados como elementos determinantes na lixiviação de boro e na eficiência dos fertilizantes em disponibilizar o nutriente para as plantas. (Sarkis *et al.*, 2024).

Segundo Dhassi *et al.* (2019), a lixiviação de boro é significativamente maior em solos arenosos em comparação com solos argilosos, especialmente em solos com baixo teor de matéria orgânica. A lixiviação de boro em solos arenosos, especialmente em áreas irrigadas, pode resultar em perdas significativas, chegando a até 85% do boro aplicado (Gupta, 1993).

A retenção de boro pelos componentes do solo é, em geral, relativamente baixa, mas pode ocorrer em argilas filosilicatas, óxidos e hidróxidos, minerais carbonatados e matéria orgânica (Goldberg e Forster, 1991). Solos arenosos, por apresentarem quantidades reduzidas de argilas filosilicatas, óxidos, hidróxidos e minerais carbonatados em comparação aos solos argilosos, têm maior tendência à lixiviação de boro, especialmente quando o teor de matéria orgânica é baixo (Sarkis *et al.*, 2024).

2.2 Deficiência e toxicidade do boro

Devido a sua margem estreita entre os níveis considerados deficientes, adequados e tóxicos para as plantas, o manejo nutricional do boro torna-se delicado. Concentrações elevadas na solução do solo podem resultar em efeitos tóxicos às plantas (Howe, 1998) e a toxicidade do boro no solo é mais difícil de ser atenuada que sua deficiência (Brdar-Jokanović, 2020). Os sintomas de toxicidade e deficiência de boro variam conforme a mobilidade do nutriente dentro da planta. Em espécies com mobilidade restrita no floema,

como cevada, trigo, soja e algodão, o boro é transportado principalmente pelo xilema e tende a se acumular nas folhas mais velhas; nesses casos, a deficiência manifesta-se primeiro nos tecidos em crescimento ativo, enquanto a toxicidade se evidencia nas folhas mais velhas, com clorose e necrose nas margens (Brdar-Jokanovic, 2020). Para resolver questões relacionadas à deficiência e toxicidade de boro, é crucial entender os transportadores e canais responsáveis pela absorção de boro nos tecidos das raízes (Takano *et al.*, 2008).

Em plantas com transporte restrito no floema, como cevada, trigo, soja e algodão, o boro é transportado principalmente pelo xilema, acumulando-se nas regiões finais do fluxo de transpiração, e quando presentes em excesso apresentam sintomas de toxicidade como clorose e necrose nas folhas velhas, com lesões marrons que inicialmente se formam nas margens e depois cobrem grande parte da superfície da folha (Brdar-Jokanović, 2020). Outrossim, a toxicidade por boro causa desequilíbrios osmóticos nas plantas, pois o excesso de boro altera a concentração de solutos dentro das células, afetando o fluxo de água e a manutenção do turgor celular. Essa desregulação compromete a expansão e divisão celular, prejudica o crescimento dos tecidos e, conseqüentemente, pode levar à interrupção total do desenvolvimento vegetativo das culturas (Arredondo e Bonomelli, 2023).

A toxicidade por boro inibe a síntese de glutathione (Brdar-Jokanović, 2020) e de tocoferol, afetando a divisão celular das raízes (Aquea *et al.*, 2012) e a expansão das paredes celulares nos brotos (Loomis e Durst, 1992). Isso resulta na diminuição do número, tamanho e peso dos frutos, além da formação de espécies reativas de oxigênio (ROSs), o que aumenta o dano oxidativo, prejudicando a fotossíntese e o sistema antioxidante das plantas (Cervilla *et al.*, 2007).

A toxicidade por boro também causa danos ao DNA (Sakamoto *et al.*, 2011) e é atribuída à interferência nos processos metabólicos, causada pela formação de ligações com os grupos ribose do ATP, NADH e/ou NADPH nas células, o que compromete suas funções normais (Reid *et al.*, 2004).

A exposição prolongada a concentrações elevadas de boro retarda o crescimento vegetativo das plantas, pois o excesso desse micronutriente provoca desequilíbrios metabólicos, danos às membranas celulares e à divisão celular, além de aumentar a formação de espécies reativas de oxigênio (ROS), que prejudicam processos fisiológicos essenciais. Como consequência, há redução do desenvolvimento dos tecidos vegetativos e comprometimento da reprodução, resultando em uma diminuição ou até na ausência completa de sementes (Roessner *et al.*, 2006).

Globalmente, a deficiência de boro é uma das deficiências de micronutrientes mais prevalentes. Alguns relatórios indicam até que sua deficiência é a mais disseminada no mundo dentre os micronutrientes (Shorrocks, 1997). O boro deve ser incluído nas formulações de fertilizantes e nos programas de fertilização para garantir uma fertilização equilibrada e uma nutrição balanceada das culturas.

Pesquisas também indicam que a carência de boro em ambientes de cultivo pode impactar negativamente o conteúdo de pigmentos fotossintéticos. Especificamente, foi observado que a deficiência de boro leva à redução nos níveis de clorofila em estudos realizados com plantas de citros (Hua *et al.*, 2017; Yan *et al.*, 2022). A deficiência de boro compromete a integridade das membranas dos cloroplastos, levando à desorganização dos tilacoides, onde se localizam os pigmentos fotossintéticos, o que favorece a degradação da clorofila e reduz seu conteúdo nas folhas (Hua *et al.*, 2017; Yan *et al.*, 2022).

Estudo anterior confirma a relação entre a deficiência de boro e a redução de clorofila em citrus (Han *et al.*, 2008). A redução na concentração de clorofila compromete a capacidade da planta de realizar a fotossíntese de forma eficiente, o que leva a uma diminuição no crescimento e na produção de açúcares, essa redução ocorre devido a interferência direta desse nutriente na função dos cloroplastos, dificultando a síntese de proteínas fotossintéticas e afetando a estrutura das membranas celulares. Como resultado, a planta acumula amido e hexoses, mas sem utilizá-los efetivamente no processo de crescimento, pois a fotossíntese não é capaz de fornecer a energia necessária (Kastori *et al.*, 1995; Zhao e Oosterhuis, 2002).

Em estudos com mostarda (*Brassica campestris*), observou-se que a assimilação de CO₂ foi comprometida pela redução da atividade enzimática e pela diminuição da concentração de CO₂ nas folhas (Sharma e Ramchandra, 1990). Similarmente, a deficiência de boro em girassol (*Helianthus annuus*) levou à diminuição da taxa de evolução de oxigênio e redução do conteúdo de clorofila (Plesničar *et al.*, 1997), afetando a eficiência fotossintética.

Em *Brassica napus*, a deficiência de boro causa dificuldades no desenvolvimento das raízes, queda precoce das flores e uma diminuição na produção de sementes (Verwaaijen *et al.*, 2023).

Estudos mostraram que a deficiência de boro nas condições de crescimento levou a uma redução significativa na produção de biomassa de Sacha Inchi e *Neolamarckia cadamba* (Yamuangmorn *et al.*, 2021; Yin *et al.*, 2022).

Em *Arabidopsis thaliana*, a privação de boro causa uma resposta imediata, semelhante à observada em células de *BY-2* de tabaco, com acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS) e morte celular na região de alongação radicular (Oiwa et al., 2013). . Esses efeitos parecem ser induzidos pela falha na formação da estrutura do gel péctico nas células em crescimento, o que prejudica a integridade da parede celular e compromete a função normal do tecido radicular (Oiwa et al., 2013). Desse modo, percebe-se em diversas culturas, o prejuízo que a ausência do boro pode causar.

2.3 Absorção de boro - interação Boro x solo x raiz

Para lidar com os desafios relacionados à deficiência e toxicidade de boro, é essencial entender os mecanismos de transporte e os canais responsáveis pela absorção desse nutriente pelas raízes das plantas (Takano et al., 2008). Adicionalmente, sua absorção depende da forma encontrada e a quantidade disponível no solo (Sun et al. 2019), além da umidade do solo.

As plantas fazem uso de sistemas homeostáticos complexos para controlar a absorção, o transporte, a distribuição e o armazenamento de boro, garantindo assim o crescimento saudável. Esses sistemas incluem canais de membrana especializados, como as proteínas NIP que facilitam a difusão de ácido bórico, e transportadores de alta afinidade BOR, que regulam o carregamento de boro no xilema e sua redistribuição para órgãos em crescimento, permitindo que a planta mantenha níveis adequados do nutriente mesmo em condições de deficiência ou excesso (Zhou et al., 2025).

A absorção de boro pelas raízes das plantas é influenciada por diversos fatores ambientais, tanto dentro quanto fora do solo, sendo a concentração de boro no meio de absorção e a taxa de transpiração imprescindíveis na quantificação.

Adicionalmente, diferentes espécies vegetais apresentam variações significativas na capacidade de acumulação de boro, mesmo quando cultivadas em condições ambientais semelhantes. Dentro da mesma espécie ainda pode haver distinções, estudos com cultivares de soja mostraram que a aplicação de boro pode melhorar condições agrônomicas como altura de planta e produtividade, com respostas variando entre genótipos, o que indica diferenças na maneira como cada cultivar acumula e utiliza o micronutriente (Libório et al., 2024).

Zhao et al. (2019) investigaram a tolerância e o potencial de acumulação de boro em quatro espécies de plantas tolerantes ao sal, observando variações significativas entre elas.. A espécie *Iris wilsonii* se destaca como a mais tolerante à toxicidade do boro e apresenta a maior

capacidade de acumulação deste elemento. Por outro lado, *Suaeda glauca* e *Puccinellia tenuiflora* demonstram tolerância semelhante ao boro, sendo que *P. tenuiflora* possui uma capacidade de acumulação superior à de *S. glauca*. A espécie *T. pannonicum*, por sua vez, apresenta menor tolerância e capacidade de acumulação de boro entre as testadas.

Bienert *et al.* (2020) relataram que, no caso do milho (*Zea mays*), o comportamento do sistema radicular sob deficiência de boro é atípico em comparação com outras espécies. Não foi observada uma redução progressiva do crescimento das raízes nem um comportamento de exploração radicular mais intenso, apesar dos sintomas evidentes de deficiência de boro nas partes aéreas e dos níveis de boro nas folhas estarem em uma faixa considerada deficiente (Figura 2).

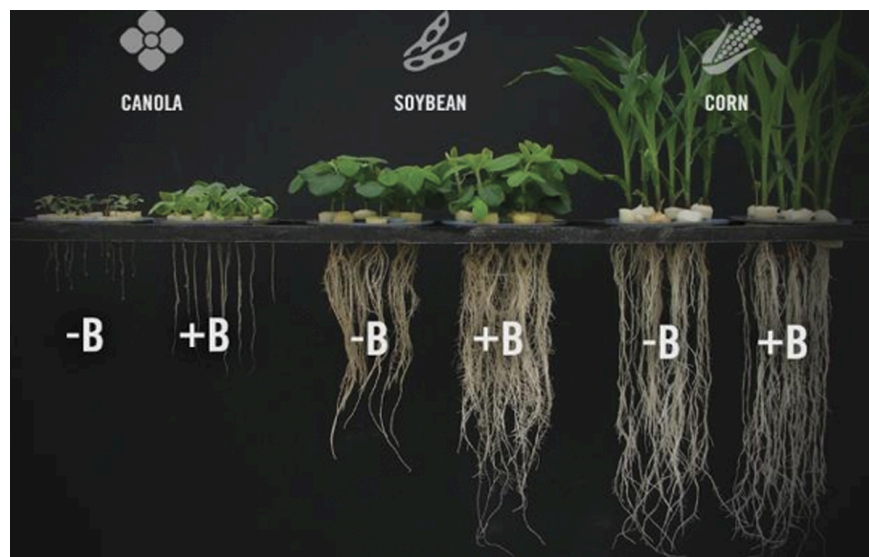


Figura 2. Plantas com boro adequado (+B) apresentam desenvolvimento radicular e germinal significativamente mais robusto em comparação com aquelas cultivadas em condições deficientes em boro (-B). Fonte: Dr. Cakmak, Universidade Sabanci.

Observa-se que no colmo (milho) não houve diferença significativa no desenvolvimento radicular em relação a quantidade de boro fornecida. Especialmente quando comparado a soja e canola.

Dentre os diversos fatores do solo, o pH é o que mais impacta a absorção de boro pelas plantas (Gupta, 1979). O estudo de Van Eynde *et al.* (2020) evidenciou que a forma química do boro no solo é fortemente influenciada pelo pH, com variações significativas nas suas propriedades de solubilidade e mobilidade. Em solos ácidos ($\text{pH} < 7$), o boro tende a se encontrar predominantemente na forma de ácido bórico ($\text{B}(\text{OH})_3$), uma molécula neutra que é altamente solúvel e, portanto, facilmente disponível para absorção pelas raízes. Por outro

lado, em solos alcalinos ($\text{pH} > 7$), o boro se transforma em borato ($\text{B}(\text{OH})_4^-$), uma espécie aniônica com menor mobilidade, que tende a ser adsorvida pelas partículas do solo, como argilas e óxidos, reduzindo sua disponibilidade para as plantas.

De maneira geral, a absorção de boro pelas plantas tende a diminuir com o aumento do pH do solo por duas razões principais. Primeiro, em pH abaixo de 7, o ácido bórico ($\text{B}(\text{OH})_3$) é a forma predominante, e, como a afinidade do solo argiloso por essa espécie é relativamente baixa, a quantidade de boro adsorvida pelo solo é pequena. À medida que o pH aumenta, a concentração de $\text{B}(\text{OH})_4^-$ em relação ao $\text{B}(\text{OH})_3$ cresce, e, devido à forte afinidade do $\text{B}(\text{OH})_4^-$ pelos minerais de argila, a quantidade de boro adsorvido pelo solo aumenta (Keren e Bingham, 1985).

O transporte ativo de ácido bórico, necessário para manter a distribuição de boro através das membranas das células, pode ser energeticamente dispendioso, pois afasta o processo do equilíbrio termodinâmico (Raven, 1980). Com isso, Raven (1980) sugeriu que a absorção de boro pelas raízes das plantas ocorre por um processo passivo, sem a necessidade de gasto energético.

Essa visão é amplamente baseada no fato de que o ácido bórico, uma das formas predominantes de boro em condições fisiológicas, é uma molécula neutra que se difunde com facilidade através da membrana plasmática (Takano et al., 2008).

O ácido bórico possui a capacidade de formar complexos com dióis, como o manitol, o que influencia diretamente sua absorção pelas plantas (Raven, 1980). No aipo, o boro presente no suco celular e nos exsudatos do floema ocorre quase inteiramente na forma de complexo B–manitol, sendo praticamente inexistente como ácido bórico livre (Hu et al., 1997). Essa formação de complexos reduz a concentração de ácido bórico disponível no citoplasma, indicando que, em condições normais, a disponibilidade do nutriente nessa forma é mínima, especialmente em espécies com altas concentrações de manitol (Raven, 1980). Além do manitol, outros compostos biológicos, como açúcares, álcoois de açúcar e ácidos orgânicos, também podem formar complexos com o boro, modulando sua mobilidade e disponibilidade para as plantas (Hu et al., 1997).

Como o boro não é facilmente transferido de órgãos mais velhos para aqueles em desenvolvimento, as plantas precisam absorver continuamente esse nutriente do solo e transportá-lo para os tecidos em crescimento (Takano et al., 2006; Tanaka et al., 2008).

2.4 Mecanismos para absorção do ácido bórico

As células radiculares utilizam três mecanismos distintos para absorver o boro na forma de ácido bórico e transportá-lo para o xilema, dependendo da concentração de boro no solo: (i) difusão passiva através da membrana plasmática, (ii) difusão facilitada por canais de proteínas intrínsecas da nodulina (NIPs), e (iii) transporte de alta afinidade, dependente de energia, ativado pela baixa disponibilidade de boro e mediado por transportadores de BOR (Brown et al., 2002; Miwa e Fujiwara, 2010; Reid, 2014).

O ácido bórico, devido ao seu tamanho molecular reduzido e à ausência de carga elétrica, apresenta uma grande capacidade de atravessar as membranas biológicas (Dordas e Brown, 2000; Stangoulis et al., 2001). É um ácido de baixa força em solução aquosa, e sua ação ácida está relacionada à aceitação de íons OH^- pelo $\text{B}(\text{OH})_3$, em vez de ceder íons H^+ . A reação que representa esse processo é a seguinte: $\text{B}(\text{OH})_3 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{B}(\text{OH})_4^- + \text{H}_3\text{O}^+$ (pKa 9,25) (Dordas e Brown, 2000; Stangoulis et al., 2001). Em solos com pH neutro ou levemente ácido, condições comuns em áreas agricultáveis, o boro se encontra principalmente na forma de ácido bórico não dissociado (Raven, 1980).

A família das proteínas intrínsecas major (MIPs) foi reconhecida como canais responsáveis pelo transporte de ácido bórico nas plantas (Wallace et al., 2006). Essas proteínas são classificadas em quatro grupos principais: as proteínas tonoplastas intrínsecas (TIPs), as proteínas intrínsecas da membrana plasmática (PIPs), as proteínas semelhantes à nodulina 26 (NOD26), chamadas NIPs, e as pequenas proteínas intrínsecas básicas (SIPs) (Wallace et al., 2006; Maurel et al., 2015). Os NIPs são subdivididos em três classes (I-III), de acordo com suas estruturas porosas. Enquanto a função das proteínas NIP I ainda não é completamente compreendida, sabe-se que as NIP II e III transportam, respectivamente, ácido bórico e ácido silícico (Wallace e Roberts, 2004; Danielson e Johanson, 2010; Roberts e Routray, 2017).

O canal NIP5;1 foi o primeiro a ser identificado em *Arabidopsis thaliana* sob condições de baixa disponibilidade de boro (Takano et al., 2006). Em *Arabidopsis*, o canal AtNIP6;1 é responsável por transportar boro para as regiões em crescimento da planta em situações de deficiência, enquanto o canal AtNIP5;1 atua na captação inicial de boro (Takano et al., 2006; Tanaka et al., 2008).

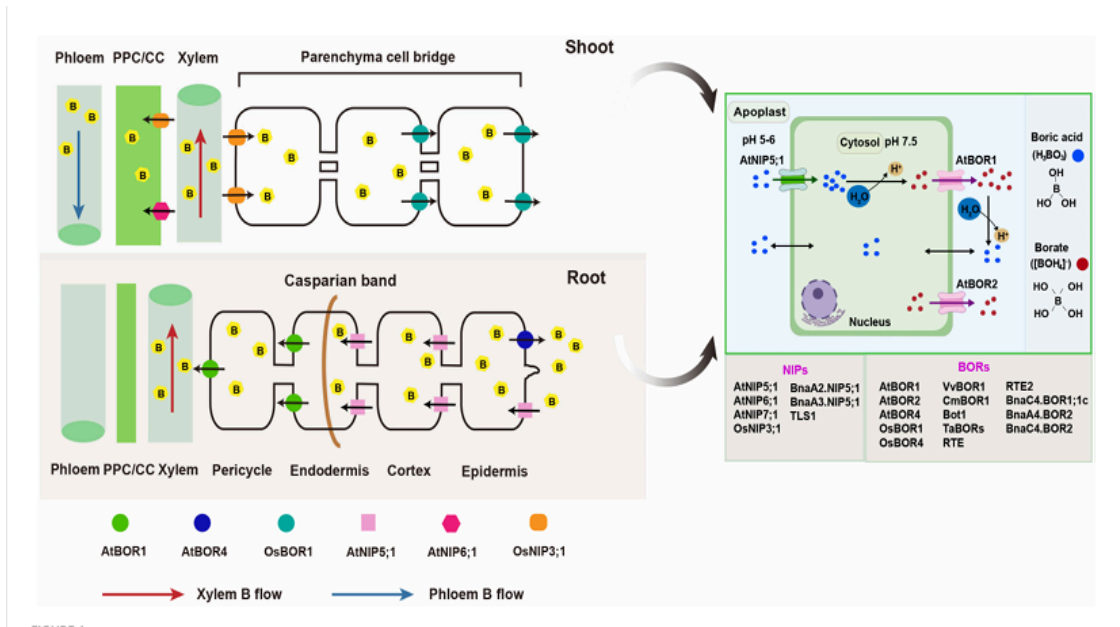


Figura 3: Visão geral dos transportadores de Boro em plantas. Fonte: Zhou *et al* (2025).

Os transportadores de boro da família BOR são essenciais para o transporte e a homeostase de boro nas plantas, facilitando o carregamento do xilema e a distribuição de nutriente nas raízes e brotos. O AtBOR1, por exemplo, atua como transportador de efluxo de boro em *Arabidopsis thaliana*, prevenindo a deficiência de boro nos brotos (Noguchi *et al.*, 2000; Takano *et al.*, 2002). Outros transportadores, como AtBOR2 e OsBOR1 em arroz, regulam o transporte de boro entre diferentes tecidos, enquanto o AtBOR4 e OsBOR4 protegem as plantas contra a toxicidade por boro, limitando seu acúmulo nas células (Miwa *et al.*, 2007; Tanaka *et al.*, 2013). Genes homólogos de BOR em outras espécies como *Brassica napus* e *Vitis vinifera* também desempenham papel na distribuição de boro para órgãos reprodutivos, como flores e sementes (Pérez-Castro *et al.*, 2012). Assim, a regulação desses transportadores é crucial para manter a homeostase de boro e garantir o crescimento das plantas.

2.5 Mobilidade do Boro nas plantas

A mobilidade do boro nas plantas varia entre as espécies. Na maioria, a distribuição desse micronutriente entre os órgãos vegetais tem uma mobilidade limitada ao transporte passivo via xilema, os sintomas de deficiência ou toxicidade são indicativos dessa condição. (Brown *et al.*, 1997).

No entanto, o boro é encontrado no floema e pode ser retranslocado, muitas vezes em quantidades suficientes para atender às demandas das regiões de crescimento. Em plantas que

produzem polióis nas folhas, como sorbitol, manitol e dulcitol, o boro é translocado de forma mais eficiente, pois forma complexos estáveis com esses compostos, facilitando seu transporte pelo floema (Brown et al., 1997). Essa complexação permite que o boro, normalmente de mobilidade limitada, se mova ativamente para órgãos em crescimento e regiões de desenvolvimento reprodutivo, suprindo as demandas das células em expansão. Assim, em espécies com altas concentrações de polióis, o boro apresenta mobilidade floema-significativa, diferindo de plantas que não sintetizam grandes quantidades desses álcoois, nas quais o boro tende a se acumular nas folhas mais velhas e sua retranslocação é limitada (Brown et al., 1997). Em espécies que não produzem grandes quantidades de polióis, o boro não é retranslocado para o floema após ser transportado para os tecidos foliares via xilema. Nesse caso, o boro tende a se acumular nas folhas, sendo considerado imóvel nessas espécies (Brown et al., 1997).

Os polióis (álcoois de açúcar), como o sorbitol, manitol e dulcitol, têm um papel fundamental na mobilidade do boro (B) nas plantas. Estudos indicam que a mobilidade do boro está associada à sua capacidade de formar complexos com compostos que possuem grupos cis-diol, como os polióis. Exemplos desses polióis incluem o sorbitol (encontrado em árvores), manitol (presente em brócolis) e dulcitol (Dordas et al., 2001). Esses compostos são produzidos durante a fotossíntese e transportados pelo floema das plantas superiores, desempenhando funções como osmorreguladores (Loescher et al., 1995). Dessa forma, o boro se movimenta nas plantas principalmente ligado a esses polióis.

2.6 Funções reprodutivas

O boro desempenha um papel crucial em diversas etapas do processo reprodutivo das plantas, relacionados à polinização. Sua presença é fundamental na germinação e desenvolvimento do pólen, na fertilização e formação de Sementes, ativação enzimática e metabolismo, absorção de água e osmorregulação, aptidão reprodutiva e viabilidade, e na resposta da planta ao estresse ambiental. (De Silva et al., 2022).

Cerca de 90% do complexo de pectina RG-II nas plantas está quimicamente associado ao boro, formando ligações cruzadas essenciais para a estabilidade da parede celular. Esse

complexo desempenha um papel crítico na reprodução vegetal, sendo fundamental para a germinação do pólen, o alongamento do tubo polínico e o funcionamento adequado do pólen durante a fecundação (Dumont et al., 2014; Funakawa e Miwa, 2015). Sem a presença de boro, a estrutura do RG-II se torna instável, comprometendo a integridade das paredes celulares do tubo polínico e dificultando o transporte de nutrientes e sinais necessários ao crescimento e à penetração do tubo no estigma. Assim, o boro é indispensável não apenas para a formação estrutural, mas também para a eficiência reprodutiva das plantas.

Esse elemento essencial é indispensável para o desenvolvimento dos tubos polínicos (Obermeyer et al., 1996) e influencia a forma e o crescimento desses tubos (Hepler, 2003). Os tubos polínicos são estruturas de crescimento rápido que dependem do boro para a germinação e para manter a elongação do tubo (Taylor e Hepler, 1997).

Durante o crescimento do tubo polínico, grandes quantidades de membranas e precursores da parede celular são transportadas por vesículas secretórias originadas do aparelho de Golgi até a extremidade do tubo, onde formam a nova parede celular, facilitando a elongação do tubo polínico (Taylor e Hepler, 1997; Ketelaar et al., 2008; Moscatelli e Idilli, 2009; Zhang et al., 2010; Bou e Geitmann, 2011).

A parede celular das plantas é composta por minerais essenciais, como boro e cálcio, fundamentais para a formação das redes de polissacarídeos pécticos nas paredes celulares (Fang *et al.*, 2016).

O boro também regula a expansão e divisão celular no tubo de pólen, facilitando sua penetração no estigma e promovendo a fertilização bem-sucedida. O boro contribui ainda para a resistência e rigidez das paredes celulares do tubo de pólen, assegurando a integridade estrutural durante seu crescimento. (Funakawa & Miwa, 2015; Zhang *et al.*, 2022).

A exposição prolongada a concentrações elevadas de boro retarda o crescimento vegetativo das plantas, resultando em uma diminuição ou até na ausência completa de sementes (Roessner et al., 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo consiste em uma revisão integrativa da literatura científica, com o objetivo de identificar, reunir e analisar evidências sobre o comportamento do boro no solo, seus processos de adsorção/dessorção e lixiviação, bem como os mecanismos de absorção e transporte em plantas e suas funções fisiológicas associadas à deficiência e toxicidade. O trabalho foi conduzido em duas etapas principais: (1) levantamento e organização dos estudos sobre dinâmica do boro no solo e (2) levantamento e síntese dos estudos sobre absorção,

transporte e funções fisiológicas do boro em plantas, visando compreender os fatores que tornam o manejo do micronutriente tecnicamente complexo.

3.1 Protocolo de investigação

A busca bibliográfica foi realizada em bases de dados eletrônicas: SciELO (<https://www.scielo.br>), CAPES Periódicos (<https://www.periodicos.capes.gov.br>), Google Scholar (<https://scholar.google.com>), ScienceDirect® (<https://www.sciencedirect.com>) e PubAg (<https://search.nal.usda.gov>), Wiley (Sobre os Revistas Wiley - Bibliotecários - Biblioteca Online Wiley), Scopus (www.scopus.com). As buscas foram executadas de forma separada e subsequente para cada etapa do estudo (solo e planta).

Nessas bases de dados, foram considerados os artigos mais relevantes encontrados a partir de artigos pesquisados, devido ao aumento de resultados genéricos em páginas posteriores e para facilitar a busca. A seleção dos estudos ocorreu por meio de triagem em três níveis:

1. Leitura De Título;
2. Leitura De Resumo;
3. Leitura Do Texto Completo Quando Título E Resumo Não Fossem Suficientes Para Confirmar A Elegibilidade.

Foram incluídos estudos publicados nos idiomas português e inglês. Para priorizar um histórico literário amplo, foi aplicado recorte temporal para publicações dos últimos 40 anos (1985–2025). Entretanto, trabalhos clássicos amplamente reconhecidos e fundamentais para a compreensão conceitual (ex.: especiação do boro, mecanismos de adsorção e bases fisiológicas do transporte) foram mantidos quando necessários para sustentar o arcabouço teórico. Ao total, foram encontrados 190 trabalhos relacionados ao tema, desses, 94 foram utilizados no corpo do trabalho, enquanto os 96 restantes foram descartados, por terem informações repetitivas e não se adequarem à ideia principal de conteúdo dessa pesquisa. Os trabalhos foram categorizados em planilhas, segundo seu eixo temático, ex: Especiação do boro.

3.2 Estratégia de busca e descritores

As buscas utilizam combinações de descritores com operadores booleanos (AND, OR) e variações em português e inglês. As principais palavras-chave utilizadas foram:

- “Boro” Or “Boron”
- “Solo” Or “Soil”
- “Ph” And (“Adsorção” Or “Adsorption”)
- “Lixiviação” Or “Leaching”

- “Dessorção” Or “Desorption”
- “CaCl₂” Or “Calcium Chloride”
- “Disponibilidade” Or “Availability”
- “Transportadores” Or “Transporters”
- “Aquaporinas” Or “Aquaporins”
- “Nip” Or “Bor1” Or “Bor4”
- “Deficiência” Or “Deficiency”
- “Toxicidade” Or “Toxicity”
- “Floema” Or “Phloem” E “Xilema” Or “Xylem”

As combinações foram ajustadas conforme o objetivo de cada etapa (solo/planta), incluindo quando necessário termos relacionados a tipos de solo (ex.: “Oxisol”, “Latosolo”, “calcareous soils”, “sandy soil”) e culturas de interesse.

Google Acadêmico

boron or boro

Em qualquer idioma Pesquisar páginas em Português

Figura 4 – Exemplificação de uma busca com a palavra “boro” em dois idiomas na base de dados Google Scholar Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

3.3 Critérios de inclusão e exclusão

Critérios de inclusão:

- Artigos Originais, Revisões E Capítulos Técnicos Com Abordagem Direta Sobre Boro Em Solos (Especiação, Sorção, Dessorção, Lixiviação, Extratores) E/Ou Boro Em Plantas (Absorção, Transporte, Homeostase, Funções Fisiológicas E Efeitos De Deficiência/Toxicidade);
- Estudos Com Descrição Metodológica Mínima (Local, Delineamento Ou Protocolo, Variáveis Avaliadas);
- Publicações Entre 1985 E 2025 (Com Inclusão De Clássicos Anteriores Quando Indispensáveis).

Critérios De Exclusão:

- Estudos Sem Relação Direta Com Boro (Menções Superficiais Sem Resultados);
- Textos Duplicados Entre Bases;
- Documentos Sem Acesso Ao Conteúdo Essencial (Apenas Resumo Indisponível Para Verificação);
- Materiais Não Científicos (Postagens, Notícias, Blogs).

3.4 Extração, organização e análise dos dados

Após a seleção, as informações foram organizadas em uma planilha contendo: autor/ano, tipo de estudo, ambiente (solo/planta), condições avaliadas (pH, textura, matéria orgânica, tipo de extrator, dose/fonte de B, irrigação, etc.), principais resultados e conclusões.

Os Estudos Foram Então Categorizados Em Quatro Eixos Temáticos:

1. Especificação Do Boro E Controle Por Ph;
2. Adsorção/Dessorção E Papel De Argilas, Óxidos E Matéria Orgânica;
3. Mobilidade E Lixiviação (Efeito De Textura, Mo, Água E Manejo);
4. Absorção, Transporte E Funções Fisiológicas (Canais/Transportadores, Xilema/Floema, Reprodução E Estresses).

A Síntese Foi Realizada De Forma Qualitativa, Comparando Convergências E Divergências Entre Estudos, Destacando Condições Edáficas E Fisiológicas Associadas À Deficiência Ou Toxicidade E À Complexidade Do Manejo Do Boro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Síntese crítica das obras: pontos convergentes e divergentes

A análise integrada da literatura evidencia que o boro se destaca como um dos micronutrientes mais complexos do ponto de vista agrônomo, tanto pela sua dinâmica no solo quanto pelos mecanismos fisiológicos de absorção e transporte nas plantas. Os estudos analisados convergem ao indicar que essa complexidade decorre, principalmente, da elevada mobilidade do boro no solo, da estreita faixa entre deficiência e toxicidade e da forte influência de fatores edafoclimáticos sobre sua disponibilidade (Das & Purkait, 2020; Brdar-Jokanović, 2020; Zhou *et al.*, 2025).

Observa-se amplo consenso de que o pH do solo exerce papel central na especificação química do nutriente, determinando sua forma predominante e seu comportamento de adsorção (Van Eynde; Weng; Comans, 2020; Keren & Bingham, 1985). De modo complementar, Sahu *et al.* (2024) reforçam que variações no pH alteram a solubilidade do boro, afetando diretamente sua disponibilidade às plantas. Também há convergência quanto à maior susceptibilidade à lixiviação em solos arenosos e com baixo teor de matéria orgânica, condição que pode resultar em perdas expressivas do nutriente (Gupta, 1993; Dhassi *et al.*, 2019; Sarkis *et al.*, 2024).

Por outro lado, a literatura também apresenta divergências relevantes. Quanto ao papel da matéria orgânica, Yermiyahu *et al.* (2001) relatam redução temporária da concentração de boro na solução do solo devido à complexação, enquanto Dhassi *et al.* (2019) indicam aumento da biodisponibilidade e menor lixiviação em solos com maior teor orgânico, sugerindo função reguladora mais ampla. Divergências também são observadas na interpretação da disponibilidade em solos argilosos, uma vez que Galán *et al.* (2008) destacam maior teor total de boro nesses solos, porém com menor fração disponível às plantas. Além

disso, diferenças interespecíficas são evidentes: Bienert et al. (2020) não observaram redução significativa do sistema radicular em milho sob deficiência, ao passo que Verwaaijen et al. (2023) reportaram comprometimento expressivo em *Brassica napus*.

4.2 Dinâmica do boro no solo: convergências conceituais

A literatura convergente (Das & Purkait, 2020; Brdar-Jokanović, 2020; Zhou *et al.*, 2025) demonstra que o boro na solução do solo está altamente influenciado por fatores edafoclimáticos, como pH, textura e umidade. A mobilidade elevada do boro no solo, especialmente na forma de ácido bórico (H_3BO_3), facilita sua movimentação e aumenta o risco de lixiviação, um fenômeno confirmado por Keren *et al.* (1985), que evidenciam que solos arenosos têm maior risco de perda por lixiviação devido à menor capacidade de retenção. Contudo, a dinâmica do boro não é limitada à mobilidade, mas também é influenciada pela adsorção às superfícies minerais e orgânicas do solo, como apontado por Van Eynde *et al.*, (2020) e outros estudos.

Além disso, estudos como os de Sá & Ernani (2016) indicam que a variação no pH do solo pode modificar o comportamento do boro, com o pH ácido favorecendo a forma não dissociada de ácido bórico, que tem alta solubilidade e é mais facilmente lixiviado, enquanto em pH mais elevado, o boro se transforma em borato ($B(OH)_4^-$), uma forma menos solúvel e mais adsorvida nas partículas do solo. Esses achados corroboram a conclusão de que a gestão do pH e da umidade do solo são fatores cruciais para garantir a disponibilidade adequada de boro para as plantas.

4.3 Fatores Edafoclimáticos e Disponibilidade de Boro

Por Jordán *et al.*, (2023), a umidade do solo influencia diretamente a mobilidade do boro, com solos mais úmidos favorecendo a movimentação do nutriente na solução do solo. O estudo de Sá & Ernani (2016) complementa essa observação ao destacar que a adsorção de boro é maior em solos com pH mais elevado, uma característica observada em solos calcários ou em áreas com correção da acidez.

Em solos mais ácidos, como os encontrados no Brasil, especialmente no Cerrado, a lixiviação de boro é mais pronunciada devido à alta solubilidade do ácido bórico, o que eleva o risco de deficiência de boro, como apontado por Sarkis *et al.*, (2024). A matéria orgânica desempenha papel crucial, como indicam estudos de Goldberg e Suarez (2012), mostrando que, embora a matéria orgânica possa reduzir temporariamente a disponibilidade de boro, ela pode aumentar sua biodisponibilidade ao longo do tempo, reduzindo também sua lixiviação.

4.4 Deficiência e Toxicidade de Boro: Desafios e Impactos nas Plantas

A pesquisa revelou que a deficiência de boro tem impactos significativos no crescimento e produtividade das plantas, sendo um dos principais desafios agrônômicos em diversos sistemas de cultivo. A toxicidade do boro, por sua vez, também é um problema crescente, especialmente em solos que apresentam pH elevado ou quando o borato predomina, levando à adsorção excessiva nas partículas do solo e à redução da disponibilidade para as plantas.

A diferença entre os sintomas de deficiência e toxicidade nas plantas pode ser observada nas alterações fisiológicas que ocorrem nas folhas. Na deficiência de boro, observa-se clorose nas regiões jovens, redução da expansão foliar e comprometimento da fotossíntese devido à desorganização dos cloroplastos e degradação da clorofila. Já na toxicidade, há necrose nas margens e pontas das folhas mais velhas, desequilíbrios osmóticos e acúmulo de espécies reativas de oxigênio, que prejudicam a divisão celular e o crescimento vegetativo (Brdar-Jokanović, 2020; Zhao e Oosterhuis, 2002).

Esses sintomas refletem como o boro, tanto em falta quanto em excesso, interfere nos processos fisiológicos essenciais para o desenvolvimento saudável das plantas. Estudos experimentais, como os de Aquea *et al.*, (2012), mostram que a toxicidade por boro afeta diretamente a divisão celular nas raízes, alterando a expansão das paredes celulares nos brotos e resultando na redução do número e do tamanho dos frutos. Este fenômeno compromete a produção de açúcares e o crescimento das plantas. Isso destaca a importância de monitorar os níveis de boro para evitar os efeitos negativos da toxicidade enquanto se busca corrigir a deficiência.

4.5 Manejo de Boro e Estratégias de Fertilização

Os resultados de nossa análise sugerem que o manejo do boro no solo exige uma abordagem cuidadosa devido à sua alta mobilidade e à estreita faixa entre deficiência e toxicidade. Estudos como os de Marupaka *et al.*, (2022) indicam que os métodos de extração de boro, como a extração com água quente e soluções de cloreto de cálcio, têm sido amplamente utilizados, embora apresentem variações na precisão dos resultados, dependendo das condições de extração e da uniformidade da amostra.

A fertilização com boro deve ser ajustada de acordo com as necessidades específicas de cada solo e cultura. A aplicação de corretivos de acidez, como calcário, tem mostrado

eficácia na redução da lixiviação do boro em solos ácidos (Soares *et al.*, 2013), o que pode melhorar sua disponibilidade para as plantas e otimizar o uso do nutriente.

5 CONCLUSÕES

A síntese da revisão evidencia que o manejo do boro representa um dos maiores desafios dentro da nutrição mineral de plantas, especialmente em solos arenosos. Nesses ambientes, a baixa capacidade de retenção, associada à reduzida presença de argila e matéria orgânica, favorece a lixiviação e torna a disponibilidade do nutriente altamente instável ao longo do ciclo da cultura. Essa condição aumenta significativamente o risco de deficiência, mesmo em áreas que receberam adubação prévia, exigindo monitoramento mais frequente e estratégias de aplicação ajustadas à dinâmica do solo.

Paralelamente, destaca-se o estreito limiar entre deficiência e toxicidade, característica que torna o manejo do boro particularmente sensível. Pequenas variações na concentração disponível podem resultar em impactos fisiológicos contrastantes, comprometendo tanto o crescimento vegetativo quanto o desenvolvimento reprodutivo das plantas. Dessa forma, a complexidade do comportamento do boro no sistema solo-planta reforça a necessidade de recomendações técnicas criteriosas, que considerem textura do solo, condições climáticas e exigências específicas de cada cultura, visando garantir equilíbrio nutricional e maior eficiência agrônômica.

A dinâmica do boro no solo é complexa, sendo influenciada por fatores como pH, textura e umidade. Sua alta mobilidade em solos ácidos e a forma como é adsorvido em solos alcalinos determinam sua disponibilidade para as plantas, tornando seu manejo um desafio.

A deficiência de boro compromete o crescimento das plantas e causa deformações nos frutos, por ser crucial para a divisão celular, a integridade da parede celular e o desenvolvimento do tubo polínico. Já a toxicidade por boro também pode prejudicar a saúde das plantas, exigindo um equilíbrio adequado na aplicação do nutriente.

Para o futuro, o desenvolvimento de protocolos de manejo eficientes, são necessários para maximizar a produtividade das culturas, garantindo que o boro seja adequadamente disponibilizado para as plantas sem causar impactos negativos ao ambiente.

REFERÊNCIAS

- ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Boron adsorption in soils from the humid tropics. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 57, n. 2, p. 353–358, 2000.
- AQUEA, F. et al. The molecular basis for the inhibition of root growth caused by boron toxicity in *Arabidopsis thaliana*. *Plant, Cell & Environment*, v. 35, p. 719-734, 2012. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2011.02446.x.
- ARREDONDO, G.; BONOMELLI, C.; NARIO, A.; ROJAS-SILVA, X.; GAETE, P. Sweet cherry response in absorption and mobility of ^{10}B applied to soil and flowers under two soil boron conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2023.
- 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. 183, p. 1–12, 2020. DOI: 10.1002/jpln.202000027.
- BRDAR-JOKANOVIĆ, M. Boron toxicity and deficiency in agricultural plants. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 21, p. 1424, 2020. DOI: 10.3390/ijms21041424.
- Brown, P.H., Shelp, B.J. Mobilidade do boro em plantas. *Plant and Soil* **193**, 85–101 (1997). <https://doi.org/10.1023/A:1004211925160>
- BROWN, P. H. et al. Boro em biologia vegetal. *Biologia Vegetal*, v. 4, p. 205-223, 2002. DOI: 10.1055/s-2002-25740. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1055/s-2002-25740>. Acesso em: 20 jan. 2026.
- CERVILLA, L. M. BLASCO, B.; RÍOS, J. J.; ROMERO, L.; RUIZ, J. Oxidative stress and antioxidants in tomato (*Solanum lycopersicum*) plants subjected to boron toxicity. *Annals of Botany*, v. 100, p. 747–756, 2007. DOI: 10.1093/aob/mcm156.
- DAS, A. K.; PURKAIT, A. Dinâmica do boro no solo: classificação, fontes, fatores, frações e cinética. *Comunicações em Ciência do Solo e Análise de Plantas*, v. 51, n. 22, p. 2778-2790, 2020.
- DAS, S.; MANDAL, B.; KUNDU, M. C.; SARKAR, D. Boron adsorption–desorption behavior in soils as influenced by soil properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, Dordrecht, v. 19, n. 1, p. 30–41, 2019.
- DE SILVA, A. L. et al. Efeitos do boro na formação de frutos, produtividade, qualidade e paternidade da macadâmia. *Agronomia*, v. 12, p. 684, 2022. DOI: 10.3390/agronomy12030684. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12030684>. Acesso em: 20 jan. 2026.
- DHASSI, K.; DRISSI, S.; MAKROUM, K.; ER-REZZA, H.; AMLAL, F.; HOUSSA, A. A. Soil boron migration as influenced by leaching rate and soil characteristics: a column study. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, Abingdon, v. 50, p. 1663–1670, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1631333>.
- DHASSI, N.; BENABDELLAH, A.; RAHMOUNI, M.; BOUKHALFA, C. Effect of soil properties on boron adsorption and availability in calcareous soils. *Arabian Journal of*

Geosciences, Cham, v. 12, art. 612, DORDAS, C.; BROWN, P. H. Permeabilidade do ácido bórico através das bicamadas lipídicas e fatores que o afetam. *Journal of Membrane Biology*, v. 16, p. 95-105, 2000. DOI: 10.1007/s002320001058.

DORDAS, M. et al. *Role of polyols in the transport of boron in plants*. *Journal of Plant Nutrition*, v. 24, n. 10, p. 1521-1531, 2001.

DUMONT, M. et al. *Response of plant growth and root morphology to boron deficiency in contrasting soil types*. *Annals of Botany*, v. 114, n. 4, p. 725-734, 2014. DOI: 10.1093/aob/mcu131

ELRASHIDI, M. A.; O'CONNOR, G. A. Boron sorption and desorption in soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 46, p. 27-31, 1982. DOI: 10.2136/sssaj1982.03615995004600010005x.

FARIA, S. M. et al. Ação de calcário e gesso agrícola sobre as propriedades químicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 5, p. 1307-1315, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/swH39pvC6zjLH4BRDN78w5P/?lang=pt>

FUNAKAWA, H.; MIWA, K. Boron transport mechanisms: collaboration between channels and transporters in plants. *Frontiers in Plant Science*, v. 6, p. 1-10, 2015. DOI: 10.3389/fpls.2015.00574.

GALÁN, E. et al. Influence of geological setting on geochemical baselines of trace elements in soils. *Application to soils of south-west Spain*. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 98, p. 89-106, 2008.

GOLDBERG, S.; GLAUBIG, R. A. Boron adsorption on aluminum and iron oxide minerals. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 49, n. 6, p. 1374-1379, 1985.

GOLDBERG, S.; FORSTER, H. S. Boron sorption on calcareous soils and reference minerals. *Soil Science*, v. 152, n. 4, p. 304-310, 1991.

GOLDBERG, S.; FORSTER, H. S.; GODFREY, C. L. Boron adsorption on reference minerals and soils. *Soil Science*, v. 156, n. 5, p. 304-310, 1993.

GOLDBERG, S.; SUAREZ, D. L. Role of organic matter on boron adsorption-desorption hysteresis of soils. *Soil Science*, v. 177, p. 417-423, 2012. DOI: 10.1016/j.ssc.2012.04.001

GU, B.; LOWE, L. E. Boron adsorption on aluminum hydroxide surfaces. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 54, n. 6, p. 1617-1621, 1990.

GUPTA, U. C. (Ed.). *Boron and Its Role in Crop Production*. Boca Raton: CRC Press, 1993. ISBN 0849365821.

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

HAN, S.; et al. A deficiência de boro diminui o crescimento e a fotossíntese, além de aumentar o amido e as hexoses nas folhas das mudas de cítricos. *Journal of Plant Physiology*, v. 165, n. 13, p. 1331-1341, 2008.

HOWE, P. A review of boron effects in the environment. *Biological Trace Element Research*, v. 66, p. 153-166, 1998.

HUA, Y.; FENG, Y.; ZHOU, T.; XU, F. Insights transcriptômicos de mRNA em escala genômica sobre as respostas da colza oleaginosa (*Brassica napus* L.) a diferentes disponibilidades de boro. *Plant and Soil*, v. 416, p. 205-225, 2017. DOI: 10.1007/s11104-017-3204-2.

HU, H.; PENN, S. G.; LEBRILLA, C. B.; BROWN, P. H. *Isolation and characterization of soluble boron complexes in higher plants: The mechanism of phloem mobility of boron*. *Plant Physiology*, v. 113, n. 2, p. 649-655, 1997. DOI: 10.1104/pp.113.2.649

OBERMEYER, G.; LÜTTGE, U.; RODRÍGUEZ-NAVARRO, A. Boron uptake in higher plants: membrane permeability and transport mechanisms. *Plant, Cell & Environment*, Oxford, v. 19, n. 3, p. 307-312, 1996.

HEPLER, P. K. Calcium and boron as essential components of plant cell walls. *Plant Physiology*, Rockville, v. 133, n. 3, p. 1015-1020, 2003.

TAYLOR, L. P.; HEPLER, P. K. Pollen germination and tube growth. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, Palo Alto, v. 48, p. 461-491, 1997.

MOSCATELLI, A.; IDILLI, A. I. Pollen tube growth: a delicate equilibrium between cell wall mechanics and intracellular dynamics. *Journal of Integrative Plant Biology*, Hoboken, v. 51, n. 8, p. 727-739, 2009.

KETELAAR, T.; DE RUITER, N. C. A.; EMMONS, A. M. C.; MULDER, B. M.; HUSSEY, P. J.; DE VRIES, S. C. Positioning of nuclei in Arabidopsis pollen tubes requires KINESIN-LIKE PROTEIN1. *The Plant Cell*, Rockville, v. 20, n. 1, p. 205-218, 2008.

ZHANG, Y.; HEPLER, P. K.; CHEN, X.; FUJIWARA, T. Boron as a structural component of the cell wall is required for pollen tube growth. *Plant Physiology*, Rockville, v. 153, n. 2, p. 622-633, 2010.

BOU, D. A.; GEITMANN, A. Actin is involved in pollen tube tropism. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 62, n. 12, p. 4059-4072, 2011.

ZHANG, W. et al. *Effect of boron toxicity on pollen tube cell wall architecture and components in Castanea mollissima*. *Frontiers in Plant Science*, 2022.

JORDÁN, M. M.; ALMENDRO-CANDEL, M. B.; NAVARRO-PEDREÑO, J.; et al. The dynamics of boron when amending agricultural soil of the Mediterranean basin with biosolids: trials in leaching columns. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 45, p. 9469-9475, 2023. DOI: 10.1007/s10653-022-01448-w

KASTORI, R.; PLESNIČAR, M.; PANKOVIĆ, D.; SAKAČ, Z. Photosynthesis, chlorophyll fluorescence and soluble carbohydrates in sunflower leaves as affected by boron deficiency. *Journal of Plant Nutrition*, v. 18, p. 1751-1763, 1995.

KEREN, R.; BINGHAM, F. T.; RHOADES, J. D. Effect of clay content in soil on boron uptake and yield of wheat. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 49, p. 1466–1470, 1985.

LANDI, A.; FERTONANI, M.; RENELLA, G.; NANNIPIERI, P. Boron adsorption and desorption in soils: influence of soil properties and pH. *Geoderma*, Amsterdam, v. 347, p. 104–111, 2019.

LI, K.; WU, Y.; TIAN, X.; ZHANG, J.; ZHANG, Y. Boron deficiency disrupts cell wall structure and inhibits vascular development in plants. *Plant Physiology*, v. 173, p. 123–136, 2017. DOI: 10.1104/pp.16.01445.

LIBÓRIO, I. F.; CAMPOS, C. N. S.; CORDEIRO SANTANA, D.; OLIVEIRA, I. C. D.; DE OLIVEIRA, J. L. G.; PEREIRA RIBEIRO TEODORO, L.; ROJO BAILO, F. H.; THEODORO, G. D. F.; TEODORO, P. E. Boron fertilization improves the agronomic performance of soybean genotypes in the Brazilian Cerrado. *Agriculture*, v. 14, p. 27, 2024.

LOESCHER, W. et al. Polyol metabolism in plants: Role in osmotic regulation. *Journal of Plant Physiology*, v. 150, n. 5, p. 559-568, 1995.

LOOMIS, W. D.; DURST, R. W. *Chemistry and biology of boron*. BioFactors, v. 3, p. 229-239, 1992. DOI: *se disponível*.

GOLDBERG, S. Reactions of boron with soils. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 193, n. 1–2, p. 35–48, 1997.

LANDI, A. et al. Boron adsorption and desorption in soils: influence of soil properties and pH. *Geoderma*, Amsterdam, v. 347, p. 104–111, 2019.

MARUPAKA, V.; MYLAVARAPU, R. S.; BERGERON, J.; SMIDT, S. J.; HOCHMUTH, G. J.; VAN SANTEN, E. Comparing Boron Soil Testing Methods for Coastal Plain Sandy Soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 53, n. 12, p. 1456-1472, 2022. DOI: 10.1080/00103624.2022.2046041.

Miwa K, Fujiwara T. Transporte de boro em plantas: regulação coordenada dos transportadores. *Ann Bot.* junho de 2010; 105(7):1103-8. doi: 10.1093/aob/mcq044. Epub 2010 Mar 12. PMID: 20228086; PMCID: PMC2887066.

MIWA, K. et al. Boron transport mechanisms: collaboration of channels and transporters. *Trends in Plant Science*, v. 13, n. 8, p. 451-457, 2008. DOI: 10.1016/j.tplants.2008.05.007.

NOGUCHI, K. et al. Defeito na translocação de boro na raiz do boro em *Arabidopsis thaliana* mutante bor1-1. *Journal of Plant Physiology*, v. 156, p. 751-755, 2000. DOI: 10.1016/S0176-1617(00)80242-4.

OIWA, Y.; KITAYAMA, K.; KOBAYASHI, M.; MATOH, T. A privação de boro causa imediatamente morte celular nas raízes em crescimento de *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh.

Ciência do Solo e Nutrição Vegetal, v. 59, n. 4, p. 621-627, 2013. DOI: 10.1080/00380768.2013.813382.

OLIVEIRA NETO, W. de; MUNIZ, A. S.; SILVA, M. A. G. da; CASTRO, C. de; BORKERT, C. M. Boron extraction and vertical mobility in Paraná State oxisol, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 5, p. 1259-1267, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500019>.

PERKINS, H. F. Adsorption of boron in soil: Influence of water content. *Soil Science Society of America Journal*, v. 59, p. 785-789, 1995.

PLESNIČAR, M.; KASTORI, R.; SAKAČ, Z.; PANKOVIĆ, D.; PETROVIĆ, N. Boron as limiting factor in photosynthesis and growth of sunflower plants in relation to phosphate supply. *Agrochimica*, v. 41, p. 144-154, 1997.

QAMAR, R. et al. Soil applied boron (B) improves growth, yield and fiber quality traits of cotton grown on calcareous saline soil. *PLOS ONE*, v. 15, p. e0231805, 2020. DOI: 10.1371/journal.pone.0231805. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231805>.

RAVEN, J. A. *Short- and long-distance transport of boric acid in plants*. *New Phytologist*, v. 84, p. 231-249, 1980.

REID, R. J. et al. A critical analysis of the causes of boron toxicity in plants. *Plant Cell and Environment*, v. 27, p. 1405-1414, 2004.

REID, R. Understanding the boron transport network in plants. *Plant and Soil*, v. 385, p. 1-13, 2014. DOI: 10.1007/s11104-014-2149-y. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2149-y>. Acesso em: 20 jan. 2026.

MAUREL, C. et al. Aquaporinas em plantas. *Physiological Reviews*, v. 95, p. 1321-1358, 2015. DOI: 10.1152/physrev.00008.2015.

DANIELSON, J. A.; JOHANSON, U. Filogenia das principais proteínas intrínsecas. *Advanced Experimental Medicine and Biology*, v. 679, p. 19-31, 2010. DOI: 10.1007/978-1-4419-6315-4_2.

ROBERTS, D. M.; ROUTRAY, P. A subfamília intrínseca de proteínas da nodulina 26. In: *PLANT AQUAPORINS: FROM TRANSPORT TO SIGNALING*. Cham: Springer International Publishing AG, 2017. p. 267-296.

ROESSNER, U. et al. An investigation of boron toxicity in barley using metabolomics. *Plant Physiology*, v. 142, p. 1087-1101, 2006. DOI: 10.1104/pp.106.084053.

STANGOULIS, J. C.; REID, R. J.; BROWN, P. H.; GRAHAM, R. D. Análise cinética do transporte de boro em *Chara*. *Planta*, v. 213, p. 142-146, 2001. DOI: 10.1007/s004250000484 2019.

WALLACE, I. S.; CHOI, W. G.; ROBERTS, D. M. A estrutura, função e regulação da família de proteínas intrínsecas semelhantes a nodulina 26 das aquagliceroporinas vegetais.

Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes, v. 1758, p. 1165-1175, 2006. DOI: 10.1016/j.bbamem.2006.03.024.

WALLACE, I. S.; ROBERTS, D. M. Modelagem por homologia de subfamílias representativas das proteínas intrínsecas maiores de *Arabidopsis*: classificação baseada no filtro seletivo aromático/arginina. *Plant Physiology*, v. 135, p. 1059-1068, 2004. DOI: 10.1104/pp.103.033415.

SAMAKOTO, T. et al. Condensin II alleviates DNA damage and is essential for tolerance of boron overload stress in *Arabidopsis*. *The Plant Cell*, v. 23, n. ?, p. ?, 2011. DOI: 10.1105/tpc.111.086314. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21917552/>. Acesso em: 7 fev. 2026.

SHORROCKS, V. M. The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant and Soil*, v. 193, p. 121-148, 1997. DOI: 10.1023/A:1004216126069.

SÁ, A. A. de; ERNANI, P. R. Boron leaching decreases with increases on soil pH. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 40, e0150008, 2016. DOI: 10.1590/18069657rbcs20150008.

SARKAR, D.; MANDAL, B.; KUNDU, M. C. Adsorption–desorption behavior of boron in soils of different agro-ecological regions. *Geoderma*, Amsterdam, v. 247–248, p. 90–97, 2015.

SARKIS, L. F. et al. Soil organic matter influences the agronomic efficiency of boron fertilizers in sandy Oxisol cultivated with soybean. *Scientia Agricola (Piracicaba, Braz)* [Internet], 2024, v. 81, e20230231. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2023-0231>.

SAHU, M. et al. *Assessing suitability of different extractants for estimating boron availability and sorption–desorption characteristics in soils*. Soil Science Society of America Journal, 2024.

SHARMA, P. N.; RAMCHANDRA, T. Water relations and photosynthesis in mustard plants subjected to boron deficiency. *Indian Journal of Plant Physiology*, v. 33, p. 150-154, 1990

SUN, A.; GOU, D.; DONG, Y.; XU, Q.; CAO, G. Extraction and analysis of available boron isotopes in soil using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 67, p. 7183-7189, 2019. DOI: 10.1021/acs.jafc.9b01455.

SILVA, J. F. da; CUNHA, S. D.; DIAS, H. A. R.; ARAÚJO, M. da S.; ROCHA, E. C.; ARAÚJO, M. da S.; PELÁ, A. Dinâmica do boro em solos agrícolas do Cerrado: Estudo sobre fontes, doses e lixiviação. *Journal of Agricultural Studies*, v. 9, n. 2, p. 488-504, 2021. DOI: 10.5296/jas.v9i2.18581

Smith, T. E.; Grattan, S. R.; Stevens, R. G. *pH dependent salinity-boron interactions impact yield and boron availability in citrus orchards*. USDA ARS Research Report, May 2013.

SOARES, A. P. et al. Influência da calagem na lixiviação de boro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 6, p. 1478-1487, 2013. Disponível em: <https://eventossilos.org.br/cbcs2013/anais/arquivos/1286.pdf>

TANAKA, M.; FUJIWARA, T. Papéis fisiológicos e mecanismos de transporte do boro: perspectivas das plantas. *Pflügers Archiv: European Journal of Physiology*, v. 456, n. 4, p. 671-677, jul. 2008. DOI: 10.1007/s00424-007-0370-8. Epub 27 out. 2007. PMID: 17965876

TANAKA, N. et al. Papéis do transportador de efluxo de boro específico de pólen, OsBOR4, no processo de fertilização do arroz. *Plant and Cell Physiology*, v. 54, p. 2011-2019, 2013. DOI: 10.1093/pcp/pct136.

Pérez-Castro, R., Kasai, K., Gainza-Cortés, F., Ruiz-Lara, S., Casaretto, J. A., Peña-Cortés, H., et al. (2012). VvBOR1, o ortólogo da videira de AtBOR1, codifica um transportador de boro de efluxo que é expresso de forma diferenciada ao longo do desenvolvimento reprodutivo de *Vitis vinifera* L. *Plant Cell Physiol.* 53, 485–494. doi: 10.1093/pcp/pcs001

TAKANO, J. et al. A proteína intrínseca maior de *Arabidopsis* NIP5;1 é essencial para a absorção eficiente de boro e o desenvolvimento das plantas sob limitação de boro. *The Plant Cell*, v. 18, n. 6, p. 1498-1509, junho 2006. DOI: 10.1105/tpc.106.041640. Epub 5 mai. 2006. PMID: 16679457; PMCID: PMC1475503.

TAKANO, J. et al. Transportador de boro *Arabidopsis* para carregamento de xilema. *Nature*, v. 420, p. 337-340, 2002. DOI: 10.1038/nature01139

TAKANO, J.; WADA, M.; LUDWIG, M.; UCHIDA, H.; TAMAI, K.; MATSUNAGA, T.; FUJIWARA, T. The *Arabidopsis* major intrinsic protein NIP5;1 is essential for efficient boron uptake under boron limitation. *The Plant Cell*, v. 18, n. 6, p. 1498–1509, 2008.

VAN EYNDE, E.; WENG, L.; COMANS, R. N. J. Boron speciation and extractability in temperate and tropical soils: a multi-surface modeling approach. *Applied Geochemistry*, v. 123, p. 104797, dez. 2020. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104797.

VERWAAIJEN, B. et al. O transcriptoma da inflorescência deficiente em boro da *Brassica napus* se assemelha a uma resposta de feridas e infecção. *Physiologia Plantarum*, v. 175, e14088, 2023. DOI: 10.1111/ppl.14088

YAMUANGMORN, S. et al. Necessidade de boro para o crescimento vegetativo dos Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.). *Journal of Plant Nutrition*, v. 45, p. 845-853, 2021. DOI: 10.1080/01904167.2021.1994594.

YAN, L.; RIAZ, M.; CHENG, J.; JIANG, C. C. A deficiência de boro e a toxicidade por alumínio ativam a defesa antioxidante e desorganizam a composição e arquitetura da parede celular na folha de laranja trifoliada. *Scientia Horticulturae*, v. 297, p. 110961, 2022. DOI: 10.1016/j.scienta.2022.110961.

YIN, Q. et al. A deficiência de boro afeta a parede celular em *Neolamarckia cadamba*. *Industrial Crops and Products*, v. 176, p. 114332, 2022. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.114332.

YERMIYAHU, U.; KEREN, R.; CHEN, Y. Boron adsorption on soil and soil constituents. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 65, n. 2, p. 406–412, 2001.

ZHAO, D.; OOSTERHUIS, D. M. Cotton carbon exchange, nonstructural carbohydrates, and boron distribution in tissues during development of boron deficiency. *Field Crops Research*, v. 78, p. 75-77, 2002

ZHAO, Q.; LI, J.; DAI, Z.; MA, C.; SUN, H.; LIU, C. Tolerância ao boro e potencial de acúmulo de quatro espécies de plantas tolerantes ao sal. *Scientific Reports*, v. 9, art. 6260, 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-42626-8.

ZHOU, D.; LUO, R.; MA, B.; CHEN, X. Transport and regulatory mechanisms of boron in plants. *Frontiers in Plant Science*, Lausanne, v. 16, art. 1653484, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1653484>.