

Síndrome das raízes atrofiadas II

O que afeta a produtividade da soja é o baixo desenvolvimento do sistema radicular, causado também pela carência de boro.

Tsuioshi Yamada*

iniciei esta série de três artigos afirmando acreditar que o principal problema que afeta a produtividade da soja é o mau desenvolvimento do sistema radicular da cultura que, devido à sua ocorrência tão generalizada, denominei de Síndrome das Raízes Atrofiadas. E que, excluindo a compactação do solo, três causas químicas – isolada ou simultaneamente – podem contribuir para tal: toxidez de alumínio, deficiência de boro e toxidez de glifosato. A toxidez de alumínio foi abordada na edição de fevereiro da **Agro DBO**. Este artigo discutirá a deficiência de boro (B). A toxidez de glifosato ficará para abril.

Patrick Brown, da Universidade da Califórnia, grande estudioso do nutriente B, adverte que “como consequência do seu papel estrutural nos tecidos em crescimento e de sua inerente imobilidade no floema na maioria das espécies vegetais, o B deve ser suprido continuamente durante a vida da planta, e as flutuações na sua disponibilidade podem ter profundo efeito no crescimento e na produtividade das culturas”.

Ismail Cakmak, da Universidade Sabanci, Turquia, outro grande estudioso do B, mencionou no Boron Day (6/10/2016), em Piracicaba, SP, que de todos os micronutrientes das plantas, a deficiência de boro é, provavelmente, a mais generalizada nas culturas. Para fins de interpretação dos resultados das análises de solo, considera-se como teor alto os valores iguais ou acima de 0,5



Figura 1. Resposta da ervilha à adubação boratada expressa em grãos maiores e mais numerosos. Fonte: Bonillo et al 2009, citados por Cakmak (2016).

mg dm⁻³ de B no solo, extraído com água quente. Levantamento realizado em 13.416 amostras de solo recebidas pelo laboratório do IAC (Campinas-SP), provenientes de 21 estados da federação, mostrou que apenas 11% delas estavam com teores considerados altos (Abreu et al, 2005).

Funções do boro

Ensina Ismail Cakmak que o boro tem importantes funções na

planta, como na estabilização e na estrutura da parede celular, no metabolismo fenólico, no metabolismo do ascorbato, na geração e detoxificação de espécies reativas de oxigênio, na integridade da membrana citoplasmática, na fixação biológica do nitrogênio, na fotossíntese e na fotoxidação, entre outras.

Para mostrar o quanto importante é o boro, basta mencionar três destes papéis – síntese de áci-

Tabela 1. Efeito do suprimento de boro na concentração de B foliar e no vazamento de K+, sacarose, compostos fenólicos e aminoácidos em folhas de girassol com 10 dias de idade (Cakmak et al, 1995).

Suprimento B (µM)	[B] µ.g.g ⁻¹ PS	Vazamento (µ.g.g ⁻¹ PF.2h ⁻¹)			
		K ⁺	Sacarose	Fenólicos	Aminoácidos
0,01	4,7	630	900	79	163
0,20	11,8	390	440	72	122
1,00	16,7	52	70	17	33
20,00	37,7	18	20	13	23

* O autor é doutor em engenharia agrônoma, e tem um site: www.agrinature.com.br

do indol acético (AIA), controle da permeabilidade da membrana citoplasmática e crescimento do tubo polínico –, para colocar sua correção, em ordem de prioridade, similar à do fósforo ou ainda da acidez do solo.

Cakmak *et al* (1995) estudaram o efeito do suprimento de B na concentração de B foliar e no vazamento de eletrólitos, como K e produtos da fotossíntese – sacarose, compostos fenólicos e aminoácidos –, em folhas de girassol com 10 dias de idade (Tabela 1). Observaram que nas plantas que receberam menor suprimento de B houve maiores perdas de K⁺ (35 vezes), sacarose (45 vezes), compostos fenólicos (6 vezes) e aminoácidos (7 vezes), comparadas às plantas bem supridas em B, perdas estas que podem reduzir a produtividade e aumentar a incidência de pragas e doenças. Isto porque, sob deficiência de B, perde-se potássio, que é fundamental na síntese dos aminoácidos; perdem-se também compostos fenólicos, que são responsáveis pelos mecanismos de defesa da planta; além de aminoácidos e sacarose que, exsudados, tornam-se nutrientes para pragas e doenças.

O papel do boro no crescimento do tubo polínico e, portanto, na polinização, é ilustrado na Figura 1. A resposta da ervilha à deficiência de B é expressa pelo menor número e tamanho dos grãos.

As espécies vegetais exibem diferentes exigências em B, sendo as dicotiledôneas, em geral, mais exigentes que as monocotiledôneas, como mostra a Figura 2, na qual as plantas de soja responderam mais ao fornecimento de B que as de milho.

O boro no solo

Na minha vivência de campo, tenho notado que não existe, entre consultores e produtores de soja, a consciência da necessidade de correção do teor de B na camada arável do solo e, muito menos,



Figura 2. A soja é mais sensível à deficiência de boro que o milho (- B = planta sem boro; + B = planta com boro). Fonte: Cakmak (2016).

Tabela 2. Teores de boro ao longo do perfil do solo em áreas com produtividade variando de 78 a 100 sc/ha e de 107 a 142 sc/ha (Dados retrabalhados a partir dos resultados publicados pelo CESB).

Produtividade	Teor de boro no perfil do solo (mg.dm ⁻³)					
	Profundidade (cm)					
sc/ha	0 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
78 - 100	0,8	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5
107 - 142	1,2	1,0	0,8	0,6	0,7	0,5

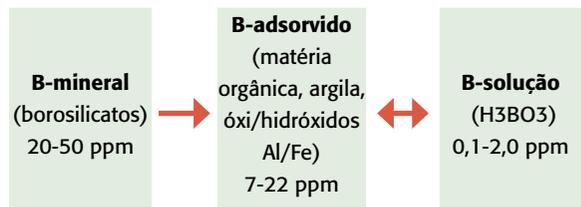
no perfil do solo. Creio que isto ocorre porque, desde os primórdios da nossa graduação, no curso de agronomia, nos ensinam que é estreita a faixa entre os efeitos benéficos e tóxicos do B, e que se houver erro na dose de aplicação, será difícil corrigi-la. Felizmente, a realidade é bem diferente, sendo muito seguro trabalhar com doses maiores do que as recomendadas atualmente, desde que se respeite a textura do solo.

Sako *et al* (2016) reportaram que as áreas campeãs de produtividade de soja do CESB apresentavam teores altos de B até 100 cm de profundidade (Tabela 2), o que pode explicar o profundo e extenso desenvolvimento radicular observado no solo. Além disso, as áreas com produtividades de 107 a 142

sc ha⁻¹ mostravam teores de B no perfil ainda mais altos que nas áreas com 78 a 100 sc ha⁻¹. Em vista desses fatos, a questão que surge é a seguinte: será que não devemos rever os padrões para os teores de B no solo, inclusive para o perfil?

Adsorção de boro no solo

De acordo com Goldberg (Plant and Soil, 193:35-48, 1997) o boro no solo encontra-se nas formas mineral, adsorvida e na solução, conforme esquema abaixo:



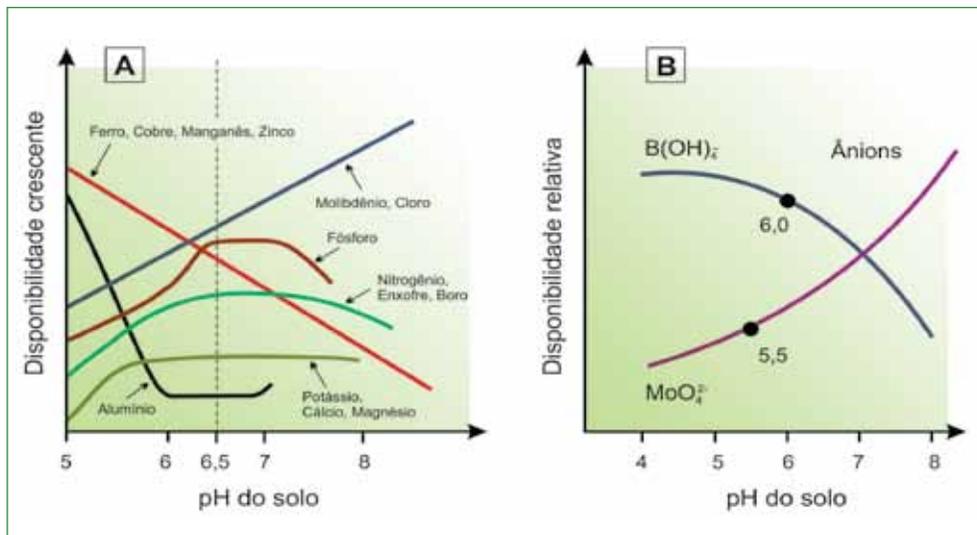
Os fatores que afetam a adsorção de B são: pH da solução, matéria orgânica, tipos de argila, umidade e temperatura do solo.

Os minerais contendo boro são muito insolúveis (turmalina) ou muito solúveis (minerais B hidratados); assim, estes não afetam a concentração de B na solução do solo que é controlada pelas reações de adsorção de B, e que determinam a quantidade de B solúvel em água disponível para a absorção pelas plantas. Estas respondem apenas para a atividade de B na solução do solo. O B adsorvido nas superfícies do solo não é reconhecido como tóxico pelas plantas. Assim, para evitar toxidez, ao se trabalhar com altas doses de B, é conveniente aguardar de 6 a 8 semanas até que se processe o equilíbrio entre o B-adsorvido e o B da solução, sendo que o excesso de B não adsorvido é lixiviado para as camadas inferiores do solo.

Os fatores que afetam a adsorção de B e, conseqüentemente, sua disponibilidade no solo são: pH da solução, matéria orgânica, tipos de argila, umidade e temperatura do solo. A matéria orgânica, os óxidos e hidróxidos de Al/Fe e os minerais de argila são os principais sítios de adsorção de B no solo.

Efeito do pH na disponibilidade do boro

Dentre as inúmeras contribuições deixadas pelo professor Malavolta, a Figura 3A, provavelmente, é a mais citada na literatura científica brasileira (Malavolta, E., 1980. Elementos de Nutrição Mineral de Plantas. p. 35). Ela resume didaticamente a relação entre pH e disponibilidade dos elementos no solo e mostra que o teor de boro aumenta com o aumento do pH até próximo de 6,5. Assim, por muito tempo acreditou-se que, ao fazer a calagem, haveria aumento imediato do teor de boro no solo.



No entanto, trabalhos na literatura mostram que a reação é contrária, ou seja, a calagem reduz a disponibilidade de B, como ilustra a Figura 3B, de Loué (Les oligo-elements en agriculture. SCPA /Agri Nathan International, 1986. 339 p.).

Já em 1937, Naftel observou, em ervilhaca, que doses crescentes de calcário causavam deficiência de boro (Figura 4), mas que as plantas voltavam a crescer com a adição do nutriente. Na época, o autor não conseguiu explicar o mecanismo para tal ocorrência, supondo até que o B fosse complexado por microrganismos do solo (Naftel, J.A., 1937. Soil liming investigations: V. The relation of boron deficiency to over-liming injury. Journal of America Society of Agronomy, 29: 761-771).

Hatcher et al (Soil Science, 104: 422-426, 1967) explicaram a deficiência de B induzida pela calagem por meio da seguinte reação:



em que: X = sítios de troca

Figura 3.

(A) Efeito do pH na disponibilidade de nutrientes, conforme Malavolta (1980), e (B) Efeito do pH na disponibilidade de boro e molibdênio, conforme Loué (1986).

Segundo esses pesquisadores, o B é adsorvido pelo Al(OH)₃ formado na reação de neutralização do alumínio trocável pelo carbonato de cálcio. Assim, além de reduzir a disponibilidade dos micronutrientes catiônicos, a calagem reduz também a disponibilidade de B, conforme observado na curva decrescente da Figura 3B.

Correção do boro no perfil do solo

Em geral, pensa-se na lixiviação de boro como um fenômeno negativo, indesejável, de perda. No entanto, ela é muito importante como parâmetro para a correção do B no perfil do solo. Para tal, basta entender que a lixiviação de B, controlada pela adsorção nas argilas, é mais intensa nos solos arenosos, com menor poder de adsorção, do que nos argilosos, e que, assim, a dose recomendada deve ser calculada de acordo com o teor de argila do solo.

Com base na lixiviação, é possível corrigir o teor de B no perfil do solo, como fizeram Wilson et al (Agronomy Journal, 43:363-367,

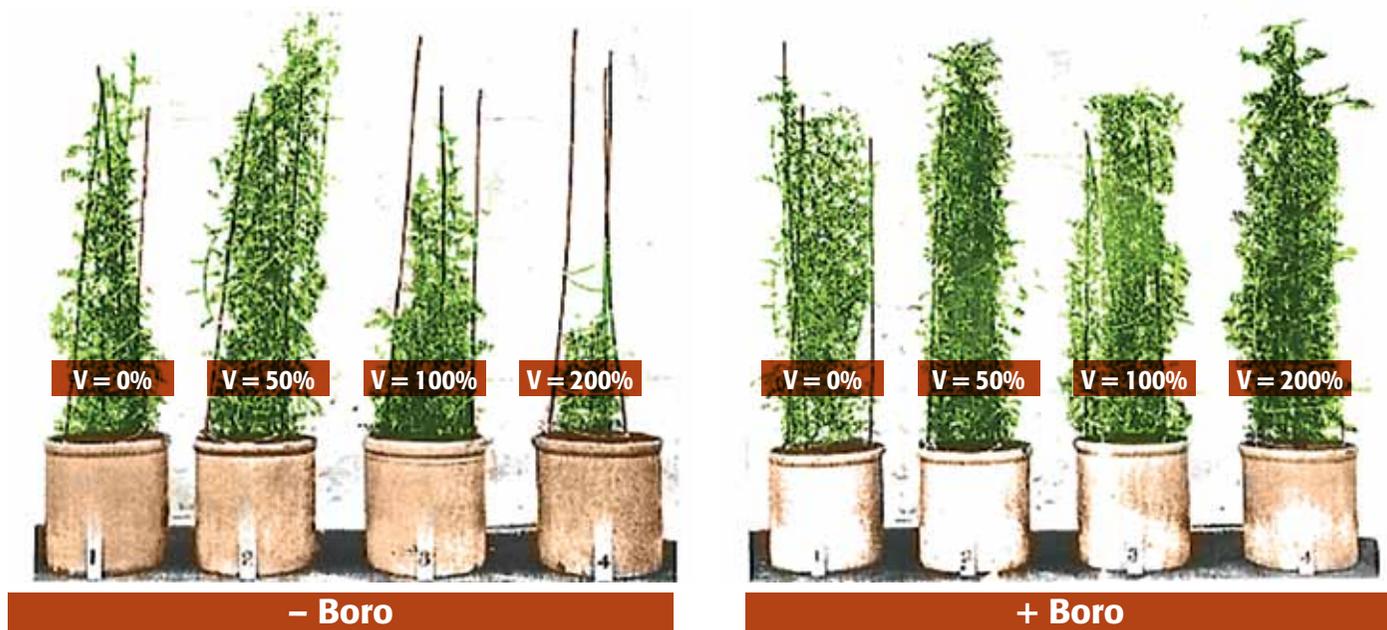


Figura 4. Influência do aumento da saturação por bases no desenvolvimento de ervilhaca sem boro (vasos à esquerda) e com boro (vasos à direita).

1951) com a aplicação de $3,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de B na forma de bórax, totalizando $20,4 \text{ kg}$ de B em 6 anos (Figura 5).

Nota-se que no solo arenoso (Norfolk) houve maior acúmulo de B solúvel em água na camada de 12 a 36 polegadas (30-90 cm), enquanto no solo argiloso (Cecil) houve maior acúmulo na camada superficial, de 6 polegadas (15 cm), porém, com acúmulo também até 90 cm de profundidade. Os resultados deste trabalho permitem concluir que: (1) a correção do teor de B no perfil do solo é importante política de longo prazo (5-10 anos); (2) é necessário utilizar doses de B maiores que as convencionais para fazer tal correção.

Efeitos do boro na mitigação da toxidez de alumínio

Dr. Dale Blevins, da Universidade de Missouri, EUA, é outro estudioso do papel do boro nas plantas. Ele e equipe observaram que os sintomas da deficiência de boro começam com o crescimento atrofiado das raízes, e que muitos dos efeitos específicos da deficiência de B nas membranas e paredes celulares são semelhantes aos da toxidez de alumínio. Assim, esses pesquisadores desenvolveram a hipótese de que a toxidez de alumínio poderia induzir à deficiência de boro nas plantas. Observaram, ainda, que a aplicação foliar de B reduzia o teor de Al nas folhas. E o

melhor efeito da aplicação foliar de B sobre a produtividade da soja foi observado com 6 parcelamentos, quando os teores de B estavam acima de 160 ppm. No trabalho, sua equipe mostrou que o B pode mitigar a toxidez de Al, tanto na camada superficial como na camada subsuperficial do solo (Figura 6).

Neste estudo, utilizou-se tubo plástico de 7,62 cm de diâmetro e 1,22 m de comprimento, no qual abriu-se uma janela longitudinal, que foi coberta com Plexiglas transparente (a cobertura com plástico preto era aberta apenas para as medições do crescimento radicular). A metade superior do tubo foi preenchida com terra retirada da camada arável de solo de lavoura com as seguintes características: pH 7,5; 42 kg ha^{-1} de P; 163 kg ha^{-1} de K; $0,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de B (adequado), 1,6% de matéria orgânica e ausência de alumínio. A metade inferior foi preenchida com terra retirada do subsolo com as seguintes características: pH 5,3; 3 kg ha^{-1} de P; 162 kg ha^{-1} de K; $0,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de B; 1,1% de material orgânica e 26% de saturação por alumínio. Em um dos tratamentos, o tubo foi preenchido com terra retirada da camada superficial, sem Al e com teor adequado de B. Apesar de o teor de B estar adequado

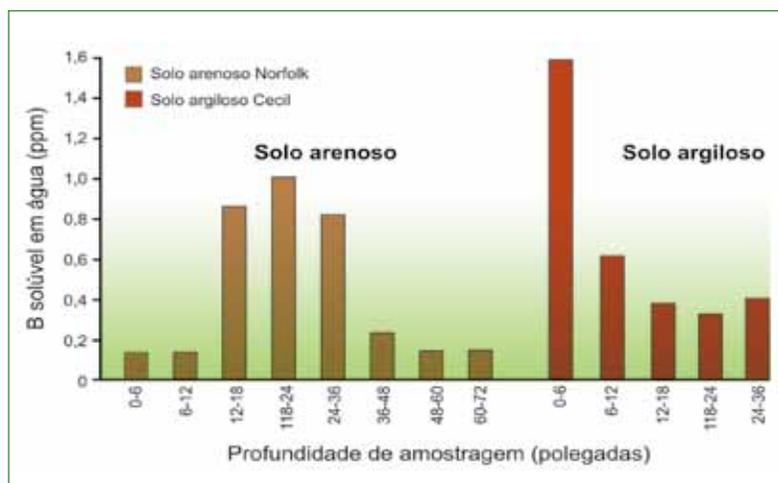


Figura 5. Teores de boro solúvel em água em várias profundidades do solo sob cultura da alfafa, após a aplicação de $3,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de B, na forma de bórax, totalizando $20,4 \text{ kg}$ de B em 6 anos.

em ambas as amostras, com e sem alumínio tóxico, a correção suplementar de B foi feita com 2,24 kg ha⁻¹ de B na forma de ácido bórico. Os 4 tratamentos foram:

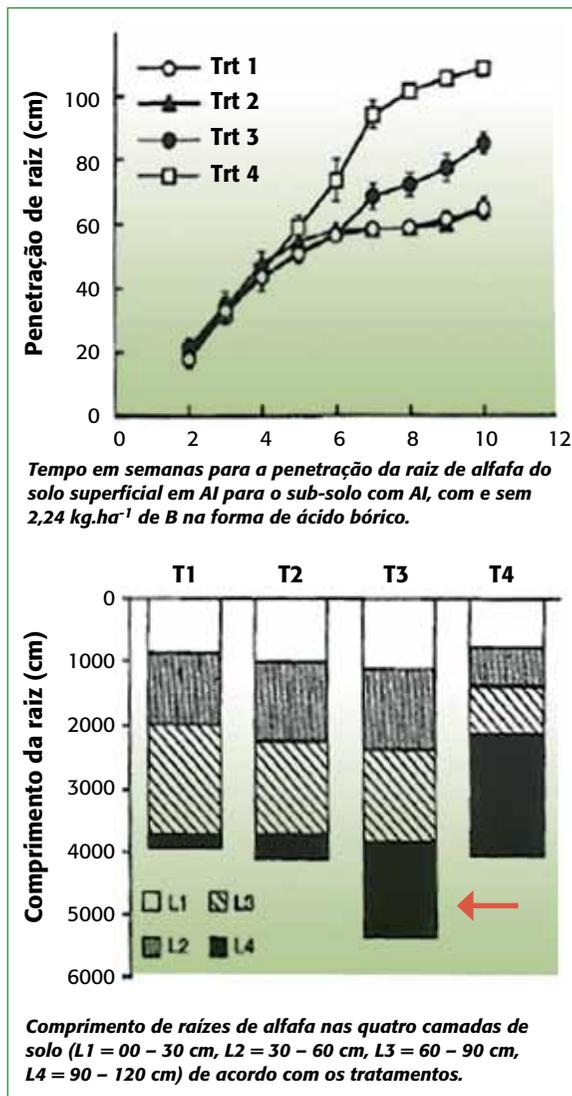
- T1: solo superficial sem correção de B; subsolo sem correção de B;
- T2: solo superficial com correção de B; subsolo sem correção de B;
- T3: solo superficial com correção de B; subsolo com correção de B; e
- T4: solo superficial no tubo inteiro.

Para esse trabalho foi utilizada a alfafa como planta teste.

Os pesquisadores observaram que as raízes cresceram normalmente no tratamento com solo superficial, com ou sem B adicional; porém, após 5 semanas, quando as raízes atingiram a camada com subsolo ácido, surgiram os efeitos positivos do B: no subsolo que recebeu B (T3), as raízes penetraram 25 cm a mais que no subsolo sem B (T2). Obviamente, o melhor crescimento de raízes foi no tubo preenchido totalmente com solo de superfície, que apresentava B adequado e ausência de alumínio tóxico (T4). O trabalho mostrou que a suplementação com boro, ocorrida no tratamento T3, ajudou a manter o crescimento radicular, mesmo em solo com 26% de saturação por alumínio. Os autores concluíram que, devido à sua mobilidade no solo, a correção de B no perfil do solo pode ser mais uma ferramenta para melhorar o crescimento radicular em profundidade. Alertaram, no entanto, que o B não substitui o calcário, pois não altera o pH e nem fornece o cálcio, muito importante para as raízes.

Cálculo da dose de boro

A dose de B pode ser calculada visando-se manter o nível de 1,0 ppm de B (extraível por água quente) na camada de 0-20 cm do solo, de forma que o excedente não adsorvido seja lixiviado e aumente o teor de boro nas camadas inferiores do solo. Repetindo-se a adubação anualmente, com o tempo, o solo poderá ser corrigido até



100 cm de profundidade, ou mais. A correção de B no perfil do solo poderá ser programada em longo prazo (5-10 anos), com doses anuais de B calculadas de acordo com o teor de argila da camada superficial e monitoradas por análise química nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm e 80-100 cm de profundidade.

Como sugestão, o cálculo da dose para correção do teor de B na camada de 0-20 cm de profundidade pode ser feita pela fórmula empírica: dose de B (kg ha⁻¹ de B) = argila (%) / 10.

Para evitar a toxidez de boro, doses maiores que 2 kg ha⁻¹ de B podem ser parceladas em duas

vezes, metade antes da primeira cultura e outra metade antes da segunda cultura. Assim, por exemplo, numa sucessão soja-milho, em solo com 40% de argila, pode-se aplicar a dose de 40/10 = 4 kg ha⁻¹ de B da seguinte forma: 2 kg ha⁻¹ de B antes da soja e mais 2 kg ha⁻¹ de B antes do milho safrinha.

Método de aplicação

Uma maneira prática de correção do solo, utilizando a dose de B citada no exemplo acima, seria a aplicação conjunta de 2 kg ha⁻¹ de B com o glifosato utilizado na dessecção em pré-plantio, com a primeira aplicação antes da cultura da soja e a segunda aplicação antes da cultura do milho. A correção pode ser feita com 10 kg ha⁻¹ de octaborato de sódio (20% B) dissolvidos em 100 litros de água, junto com o glifosato. Pode-se usar, também, qualquer outra fonte de boro de alta solubilidade.

Conclusões

A concentração de B na solução do solo, onde ele é absorvido pelas plantas, é controlada pelo mecanismo de adsorção.

A matéria orgânica do solo, os óxidos e hidróxidos de Al/Fe e os minerais de argila são os principais sítios de adsorção de B.

As plantas respondem apenas para a atividade de B na solução do solo; o B adsorvido nas superfícies do solo não é reconhecido como tóxico pelas plantas.

A adsorção de B aumenta com o pH do solo, assim, a calagem diminui a disponibilidade de B na solução do solo.

Assim como o gesso, o B pode mitigar a toxidez de Al, tanto na camada superficial como nas camadas subsuperficiais do solo. Devido a sua mobilidade no solo, a correção do B nas camadas subsuperficiais pode constituir mais uma prática para prevenir a síndrome das raízes atrofiadas e, assim, melhorar a resistência das plantas à seca.

Figura 6. Efeito do tratamento com B na penetração de raízes na camada subsuperficial e comprimento de raízes de alfafa nas diferentes camadas do tubo. Fonte: Lenoble, Blevins e Miles (Plant, Cell and Environment, 19: 1143-1148, 1996).