



**INTERAÇÃO BORO X SILÍCIO NA NUTRIÇÃO,
CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DO ARROZ**

DANIELA DA SILVA BENEDITO

2004



THE NATIONAL ARCHIVES
COLLECTION OF DOCUMENTS

1964-1965
1966-1967
1968-1969
1970-1971
1972-1973
1974-1975
1976-1977
1978-1979
1980-1981
1982-1983
1984-1985
1986-1987
1988-1989
1990-1991
1992-1993
1994-1995
1996-1997
1998-1999
2000-2001
2002-2003
2004-2005
2006-2007
2008-2009
2010-2011
2012-2013
2014-2015
2016-2017
2018-2019
2020-2021
2022-2023
2024-2025

DANIELA DA SILVA BENEDITO

**INTERAÇÃO BORO X SILÍCIO NA NUTRIÇÃO,
CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DO ARROZ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas, área de concentração em Fertilidade do Solo, para a obtenção do título de "Mestre"

Orientador

Prof. Antonio Eduardo Furtini Neto

RT

LAVRAS

MINAS GERAIS – BRASIL

2004

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Benedito, Daniela da Silva

Interação boro x silício na nutrição, crescimento e produção do
arroz / Daniela da Silva Benedito. -- Lavras : UFLA, 2004.

62 p. : il.

Orientador: Antonio Eduardo Furtini Neto.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Arroz. 2. Cultivo. 3. Adubação. 4. Nutrição mineral. I. Universidade Federal
de Lavras. II. Título.

CDD-633.18891

DANIELA DA SILVA BENEDITO

**INTERAÇÃO BORO X SILÍCIO NA NUTRIÇÃO,
CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DO ARROZ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas, área de concentração em Fertilidade do Solo, para a obtenção do título de "Mestre"

APROVADA em 06 de fevereiro de 2004

Prof. Ruy Carvalho

UFLA

Profª. Janice Guedes de Carvalho

UFLA

Prof. Carlos Alberto Silva

UFLA



Prof. Antonio Eduardo Furtini Neto

UFLA

(Orientador)

LAVRAS

MINAS GERAIS – BRASIL

Ao meu filho, Luiz Felipe,
meu Amor maior e mais pleno;
À minha tão amada e querida mãe, Dirce,
exemplo maior de mulher batalhadora e perseverante,
que sempre lutou, e luta, para fazer meu caminho pela vida, feliz;
Ao meu avô Chiquinho e minhas avós, Cida e Joana,
pessoas essenciais na minha caminhada;

OFEREÇO

A todas as pessoas que acreditaram no meu trabalho,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela constante assistência em minha vida.

À Universidade Federal de Lavras por possibilitar a realização desse trabalho.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu orientador, professor Furtini, pela confiança e incentivo ao meu trabalho; por ajudar a ampliar meus horizontes e conhecimentos, da vida e da ciência, e por ter me dado a oportunidade de realizar este projeto sob sua orientação.

À professora Janice, pelas valiosas sugestões, pelo acompanhamento em nosso experimento e pela participação na Banca Examinadora.

Aos professores Ruy Carvalho, do Departamento de Química/UFLA, e Carlos Alberto Silva, do Departamento de Ciência do Solo/UFLA, pela participação na Banca Examinadora e pelas críticas e sugestões concedidas ao meu trabalho.

Às secretárias Adriana, Maria Alice e Vera e aos laboratoristas, por todos os favores prestados, pelos ensinamentos e pela paciência que têm conosco.

Ao Pezão, trabalhador prestimoso, por tudo que fez por mim e pelo meu trabalho e por várias risadas que damos com ele.

Aos bolsistas de iniciação científica, Leandro, Zé Zilton, Fabiano e Breno, que foram de valiosa ajuda no desenvolvimento do meu experimento, e à doutoranda Alessandra Mayumi Tokura, pelos ensinamentos "silícicos" e pelo bom convívio que tivemos durante nossos experimentos.

A Val, responsável pelo setor de informática do departamento, pelos auxílios técnicos e pela amizade que fizemos enquanto trabalhamos juntas.

Ao meu filho Luiz Felipe, que faz da minha vida uma alegria, que me proporcionou o prazer de ser mãe, que me encaminha nos objetivos da vida e que está presente em todos os meus momentos.

À minha mãe, que não me possibilita descrever qualidades por serem estas inúmeras, pessoa extremamente amada e que, mesmo longe, está sempre presente.

À minha amiga-irmã Flávia, “Mãe Preta do Lipe”, pessoa muito especial em minha vida, que sempre foi companheira, amiga, irmã e muuuuuuitas vezes babá, tia, comadre... Agradeço de maneira especial pela sua amizade!!!

Ao Ramon, meu namorado. Pessoa muito especial e querida, presente em determinada fase deste curso e bastante importante na época de finalização de mais uma etapa da minha vida profissional, o mestrado!!!

Às Hermanas, Dani Marega, Rê e, mais uma vez, Flávia, e a Ju Kogake, minha comadre, pelos ombros bastante amigos que me ofereceram em vários momentos da minha vida aí!!!! Personas importantíssimas para mim! Sem amigos de nada vale nosso conhecimento e sabedoria...

Aos meus companheiros de departamento, Zé Roberto, Orlando, Gigi, Ana Rosa, Adrianinha, Serginho, Juliano Maly, Renato, Antônio Marcos, Barberi, Nildo, Dandrea, Leyser, Silvana, Lisi, Dione, Toninho, Walfrido, Lucas, Bambuilson, e demais, pelos “mega eventos” que organizamos juntos e pela boa convivência que tivemos durante esse período por que passamos.

Aos demais amigos e amigas que me escutaram, riram e choraram, que comigo muitas vezes comemoraram, que me acolheram (QG dos URSO), que estiveram próximos nesta e nas demais fases da minha vida, e que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho!

Um mundo positivo, é nisso que eu acredito!!!

Em um mundo positivo, haveria mais diálogo e menos conflito. Haveria mais amizade, mais saúde, mais respeito à natureza. Haveria menos carros e mais bicicletas. Menos choro e mais sorrisos. Menos solidão e mais companheirismo.

Em um mundo positivo, toda criança teria um prato de comida, uma boa escola, uma família para se espelhar. Haveria menos perfeição e mais compreensão. Haveria mais esportes, mais fins de semana.

Em um mundo positivo, todo ser humano teria o direito de fazer uma obra-prima que entrasse para a história da humanidade.

E todos seríamos iguais nos direitos e no dever de viver cada dia melhor.

É nisso que eu acredito, em um mundo positivo!!!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1 Aspectos fitotécnicos associados ao arroz	4
2.2 O boro (B).....	5
2.3 A toxidez por boro.....	10
2.4 O silício (Si).....	13
2.5 Interação boro x silício.....	17
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1 Neossolo Quartzarênico.....	26
4.1.1 Matéria seca de grãos.....	27
4.1.2 Matéria seca de parte aérea (MPSA), matéria seca de raiz (MSR), número de perfilhos (PERF), número de panículas (PAN) e número de grãos por panícula (GrPAN).....	32
4.1.3 Peso de cem grãos.....	38
4.1.4 Teor de boro em grãos e na parte aérea.....	39
4.1.5 Teor de silício em grãos e na parte aérea.....	42
4.2 Latossolo Vermelho distroférico.....	44
4.2.1 Número de perfilhos (PERF) e número de panículas (PAN).....	45
4.2.2 Porcentagem de grãos cheios e peso de cem grãos.....	47
4.2.3 Teor de boro em grãos e na parte aérea.....	50
4.2.4 Teor de silício em grãos e na parte aérea.....	51
5 CONCLUSÕES.....	53
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

RESUMO

BENEDITO, Daniela da Silva. **Interação boro x silício na nutrição, crescimento e produção do arroz.** LAVRAS: UFLA, 2004. 62 p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)¹

Com o objetivo de avaliar a interação boro x silício na nutrição, no crescimento e na produção do arroz nas camadas superficiais (0-20cm de profundidade) de Neossolo Quartzarênico (RQ) e de Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) da região de Lavras (MG), foram conduzidos dois experimentos em casa-de-vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (MG), no período de outubro de 2002 a janeiro de 2003. Cada solo foi submetido a três incubações sequenciais: CaCO_3 p.a. para elevar a saturação de bases para 50%, fertilização básica, cinco doses de boro (H_3BO_3) e quatro doses de silício (H_4SiO_4). Três plantas de arroz (cultivar Primavera) foram cultivadas por 120 dias em cada vaso com capacidade para 5 dm^3 de solo, totalizando 60 vasos por experimento. Em ambos os experimentos foram analisadas as variáveis: MSGr (Matéria Seca de Grãos), MSPA (Matéria Seca de Parte Aérea), MSR (Matéria Seca de Raízes), PERF (Número de Perfilhos), ALT (Altura de Plantas), PAN (Número de Panículas vaso⁻¹), GrPAN (Número de Grãos Panícula⁻¹ vaso⁻¹), PGrC (Porcentagem de Grãos Cheios vaso⁻¹) e PCGr (Peso de Cem Grãos vaso⁻¹), além do teor de B em grãos (TBGr) e na parte aérea (TBPA) e do teor de Si em grãos (TsiGr) e na parte aérea (TSiPA). Ajustaram-se equações de regressão para essas variáveis em função das doses de B e das doses de Si (fatorial 5 x 4 com 3 repetições; delineamento inteiramente casualizado). Plantas de arroz cultivadas no RQ tiveram aumento na MSGr com doses iniciais de B, reduzindo com doses maiores; incremento linear na MSGr conforme aplicação das doses de Si; MSPA, MSR, PERF, PAN e GrPAN reduziram com aplicação de B no solo, embora o PCGr tenha aumentado. As plantas de arroz cultivadas no LVdf tiveram o número de perfilhos e de panículas reduzidos com a aplicação de B no solo e a porcentagem de grãos cheios e o peso de cem grãos foram aumentados com a aplicação das doses de Si.

¹ Comitê Orientador: Antonio Eduardo Furtini Neto – UFLA (Orientador).

ABSTRACT

BENEDITO, Daniela da Silva. Boron x silicon interaction in the nutrition, growing and yield of rice. LAVRAS: UFLA, 2004. 62 p. (Dissertation - Master in Soils and Plant Nutrition)¹

The effect of boron x silicon interaction on nutrition, growing and yield of rice plants was evaluated in two soil materials: an Typic Quartzipsamment (TQ) and an Rhodic Hapludox (RH), both from Lavras/MG. The experiment was done during the growing season of October/2003 to January/2004, under greenhouse condition. The soil samples were incubated with CaCO_3 to increase base saturation up to 50%. Fertilization was done according to the plant needs, along with five levels of H_3BO_3 and four levels of H_4SiO_4 , accounting 20 different treatments, in a completely randomized factorial design, with 3 replicates. Each pot had 5 dm³ of soil sample. Three plants were grown during 120 days. The following parameters were evaluated at harvesting: dry matter of grains (DMG), dry matter of shoot (DMS), dry matter of root (DMR), number of tillers (NT), height of plants (PH), number of panicles per pot (NP), number of grains per panicle (NGP), full grain percentage (FG), weight of 100 grains (WG), as well as the boron and silicon concentration in shoot and root. Regression equations were adjusted for each parameter. Increasing B x Si in the TQ soil decreased DMG. Dry matter of grains increased lineally with increasing Si. Increasing B decreased DMS. DMR, NT, NP and NGP, and increased FG. Increasing B un RH soil increased NT and NP, while FG and WG increased with increasing Si.

¹ Guidance Committee: Antonio Eduardo Furtini Neto – UFLA (Major Professor).

1 INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) constitui um alimento básico de grande parte da população brasileira. De 1980 até os dias atuais, o consumo *per capita* variou entre 70 e 75 quilos por habitante, sendo que a produção aumentou de 9 para 12 milhões de toneladas, resultando num aumento médio de 1,3% ao ano. A produção brasileira é de aproximadamente 10,4 milhões de toneladas colhidas em 3,2 milhões de hectares, sendo 1,5 milhão de toneladas importado na safra de 2002/03 (Agrianual, 2003).

Atualmente, existe a necessidade de aumentar a produtividade desta cultura com o objetivo de atender à crescente demanda decorrente do aumento populacional. Uma alternativa a curto e médio prazos seria a combinação de fatores tecnológicos e sócio-econômicos. Um dos fatores tecnológicos capaz de contribuir para a elevação da produtividade orizícola nacional é a utilização dos fertilizantes químicos e orgânicos, os quais, se não forem usados de maneira adequada, podem levar ao baixo retorno econômico e resultar em sérios problemas ao meio ambiente (Fornasieri & Fornasieri Filho, 1993).

Para maximização da produtividade vegetal, há necessidade de uma adequada disponibilidade tanto de macro quanto de micronutrientes, os quais são exigidos de acordo com as exigências em maiores ou menores quantidades pelas plantas, respectivamente. Caso contrário, a produção será limitada pelo nutriente em menor disponibilidade, ou ainda por aquele que se encontrar em quantidade acima do nível tolerado pela cultura, portanto em nível tóxico às plantas (Malavolta, 1980).

A aplicação de fertilizantes deve ser modulada pelo potencial de extração e/ou exportação dos nutrientes pelas culturas. Além da preocupação em se fornecerem todos os nutrientes de forma equilibrada, é preciso definir quantidades ótimas de cada nutriente em função da sua disponibilidade no solo e

dos requerimentos nutricionais da espécie vegetal a ser cultivada (Furtini Neto et al., 2001).

Nos últimos anos, o interesse pelo uso de micronutrientes na agricultura tem sido maior, notadamente de boro (B) e zinco (Zn), uma vez que a produtividade agrícola em algumas regiões do Brasil vem sofrendo sérias reduções pela deficiência desses nutrientes, em função da baixa fertilidade de alguns solos, da maior remoção pelas sucessivas colheitas e do uso indiscriminado de calcário e adubos fosfatados, que poderão vir a contribuir para que ocorra maior insolubilização de micronutrientes (Mariano, 1998).

O boro talvez seja o nutriente com menor consumo de luxo, apresentando uma faixa muito estreita entre os teores de deficiência e de toxidez, fazendo com que haja necessidade de um planejamento cuidadoso em programas de adubação com este nutriente, levando-se em consideração o teor inicial existente no solo (Bergmann, 1992).

Este nutriente não é encontrado livremente na natureza devido, como o carbono, à facilidade de formar ligações covalentes estáveis por hibridação. Ocorre em concentrações muito baixas na maioria dos solos, porém altas concentrações podem ocorrer no solo naturalmente ou no lençol freático, podendo também ser adicionado ao solo através de processos como a mineração, a adição de fertilizantes, ou ainda, através da água de irrigação. Sua toxidez é relativamente comum em regiões áridas e semi-áridas (Nable et al., 1997).

Uma outra classificação dos elementos minerais absorvidos pelas plantas, além dos essenciais e dos tóxicos, é a dos úteis, que são aqueles que não são essenciais, ou seja, a planta pode viver sem eles, entretanto, sua presença é capaz de contribuir para o crescimento, produção ou para a resistência a condições desfavoráveis do meio (clima, pragas e moléstias, compostos tóxicos do solo ou do ar) (Malavolta, 1980).

Um exemplo de elemento mineral útil é o silício (Si), o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, o qual é favorável a muitas espécies vegetais, principalmente da família Poaceae. O arroz, pertencente à essa família, é considerado acumulador de uma quantidade relativamente grande de silício, apresentando teor em torno de 2% nas folhas (Mengel & Kirkby, 1987). Apesar de esse elemento não ser considerado essencial, do ponto de vista fisiológico sua absorção traz inúmeros benefícios para esta cultura, mostrando, assim, sua “essencialidade agrônômica” para o aumento e/ou produção sustentável da cultura, assim como para a redução no acamamento e proteção contra estresses bióticos e abióticos (Barbosa Filho et al., 2000).

Tem sido reportado que o Si, quando adicionado ao solo, aumenta a disponibilidade de fósforo (P) para as plantas (Savant et al., 1999; Carvalho et al., 2000), e diminui a toxidez de ferro (Fe), manganês (Mn) e alumínio (Al), em determinadas condições de cultivo (Horiguchi, 1988).

Foi observado por Nable et al. (1990), em experimentos independentes, que genótipos de cevada com maiores suscetibilidades à toxidez por B, acumularam Si em maiores taxas que genótipos menos suscetíveis, sugerindo uma interação entre estes elementos.

Diante da necessidade de esclarecimentos científicos em relação à interação do silício com outros elementos, este estudo teve por objetivo avaliar o efeito de combinações de doses de silício e de boro sobre a nutrição, o crescimento e a produção do arroz, em dois solos, neossolo e latossolo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aspectos fitotécnicos associados ao arroz

O arroz pertence à família Poaceae, subfamília Pooideae, tribo Oryzaceae e gênero *Oryza*, que é o mais rico e importante de sua tribo e compreende cerca de 25 espécies, dispersas espontaneamente nas regiões tropicais da Ásia, África, Américas do Sul e Central, sendo que, entre essas espécies, encontram-se apenas duas cultivadas: *Oryza glaberrima* Steud. e *Oryza sativa* L.. Admite-se que tais espécies provenham de dois centros genéticos de origem: o asiático, provavelmente o principal, e o africano, que teria dado origem às espécies sul-americanas.

O arroz uma das plantas cultivadas mais antigas do mundo. Sua história se confunde com a trajetória da própria humanidade, sendo praticamente impossível determinar com precisão a época em que o homem começou a cultivá-lo. A importância desta cultura é tão marcante que alguns povos orientais chegaram a elegê-lo como símbolo da fartura e a lhe atribuir uma alma, à qual tributavam honras e cerimônias (Pereira, 2002).

Esse cereal, por participar da vida cotidiana de aproximadamente metade da população mundial, tornou-se responsável por um amplo repositório de valores, no qual se misturam desde algum preconceito até um pouco de lenda e mito. Em determinadas regiões da Indonésia, os arrozais são considerados sagrados, não sendo permitido, sequer, o uso da técnica da adubação, para que as lavouras não se tornem “poluídas”. Na Ilha de Java, as moças não podem ser consideradas aptas para o casamento enquanto não provarem sua habilidade para cozinhar com perfeição uma tigela de arroz e, até mesmo entre os povos ocidentais, ainda é comum a saudação nas cerimônias de casamento.

O arroz é o alimento básico de 40 % da humanidade, provendo 24,2% do total de calorias e 17,9 % das proteínas totais ingeridas, considerando todas as classes sócio-econômicas. Sobressai entre os principais cereais cultivados, sendo apenas suplantado em área cultivada por trigo e em rendimento de grãos, pelo milho (Fornasieri & Fornasieri Filho, 1993).

A China ocupa posição de destaque, seguida pela Índia, sendo relativamente modesta a posição brasileira, com uma produção correspondente a 2 % da mundial.

A área colhida com arroz no Brasil, na safra 2003/04, é de 3,2 milhões de hectares, e a produção brasileira é de aproximadamente 10,4 milhões de toneladas. O consumo *per capita* nacional é de 64,6 kg habitante⁻¹ ano⁻¹ (Agrianual, 2003).

O arroz é cultivado em todo território nacional, concentrando-se, principalmente nas regiões Centro Oeste, Sudeste e Sul.

Foi relatado por Korndörfer & Datnof (1995) que certas culturas como o arroz e a cana-de-açúcar, acumulam grandes quantidades de silício e geralmente produzem mais quando cultivadas em solos que apresentam altos teores de silício solúvel.

2.2 O boro (B)

O B é um elemento não-metal do grupo 3A e de pequeno raio iônico. Assim como o óxido SiO₂, o óxido B₂O₃ forma vidros que se cristalizam com dificuldade (Cotton & Wilkinson, 1972).

Em solução, as formas mais importantes são o ácido bórico, H₃BO₃, que possui grande semelhança com o ácido silícico, e o ânion tetrahidroxoborato (III), [B(OH)₄]⁻, sendo essa forma predominante em valores de pH do solo acima de 9,2. Trata-se de um ácido muito fraco e sua dissociação parcial somente ocorre em valores elevados de pH (Lindsay, 1972).

Este nutriente participa da estrutura de elevado número de minerais, embora poucos apresentem alguma importância, quer pelo seu valor econômico, quer pela quantidade presente nas rochas. Nas rochas ígneas seu teor é baixo, pois seu raio iônico é muito menor do que o dos outros elementos mais abundantes em silicatos que ocorrem nestas rochas. No entanto, sua concentração é maior em granitos do que em basalto, diferentemente dos demais micronutrientes (Alleoni, 1996).

A geoquímica do elemento é influenciada sensivelmente pela sedimentação. Os teores nos sedimentos marinhos podem chegar a ser de dez a quinze vezes maiores do que nos sedimentos continentais e nas rochas ígneas e metamórficas. Nos sedimentos continentais, os teores de boro são mais elevados nos folhedos, em relação aos arenitos (Rankama & Sahama, 1962).

O boro um elemento essencialmente litófilo (tende a se acumular na camada silicatada externa da Terra), ocorrendo nos minerais sempre combinado com o oxigênio, em coordenação triangular, formando boratos ou, mais raramente, em coordenação tetraédrica, substituindo o silício nos borossilicatos. Entretanto, isso ocorre raramente, devido à grande diferença entre os raios iônicos dos dois elementos (B-0,023nm; Si-0,043nm), sendo esta substituição parcial (Marconi et al., 1980).

A natureza da adsorção dos boratos em solos ainda não é bem compreendida. Entretanto, difere substancialmente daquela de outros ânions como fosfato e molibdato, em que a adsorção aumenta com a redução do pH do solo. Para o borato, a adsorção às partículas do solo ocorre quando o pH do mesmo está situado entre 7,0 e 9,0; conseqüentemente sua disponibilidade será menor em solos alcalinos. A retenção é parcialmente determinada por minerais de argila e sesquióxidos; portanto, solos ricos em argila têm menores teores de B solúvel em água em relação ao nível total de B. A máxima adsorção ocorre em faixa de pH de 7,0 a 9,0 e, provavelmente, envolve a reação de íons boratos com

hidroxilas das superfícies, procurando atender às exigências estequiométricas para a formação de um complexo diol borato (Mengel & Kirkby, 1987).

Algumas evidências sugerem que boratos adsorvidos se difundem para o interior de posições intercaladas. Boratos podem também estar adsorvidos ao húmus, novamente condensados com grupos dióis, que nesse caso estão provavelmente associados com ácidos carboxílicos. Como essa ligação é mais forte que de boratos sesquióxidos sob condições neutras ou ácidas, os colóides húmicos devem formar o principal reservatório de B na maioria dos solos agrícolas.

É bem reportado que a disponibilidade de B é consideravelmente reduzida pela calagem, desde que essa eleve o pH para valores superiores a 7,0, a partir do qual ocorrerá a máxima adsorção do borato às partículas do solo, podendo levar as plantas à deficiência do micronutriente. É também possível que em solos com pH elevado, o B seja substituído por Al no complexo Ca-aluminossilicatos.

Os teores de B de solos de zonas climáticas áridas e semi-áridas são, geralmente, maiores que de zonas climáticas úmidas. Sob condições de alta lixiviação, o B é facilmente removido dos solos. Solos podzólicos, em particular, são pobres em B. Por outro lado, como o teor de B nas águas oceânicas é realmente apreciável, solos afetados pelo mar devem conter altos níveis de B (Mengel & Kirkby, 1987).

O teor de argila, o teor de carbono orgânico, a capacidade de troca de cátions, a superfície específica e a condutividade elétrica do extrato saturado são fatores que apresentam correlações significativas com o boro adsorvido em diferentes tipos de solo (Elrashidi & O'Connor, 1982).

O boro pode ser adsorvido por diferentes minerais de argila, com capacidades variadas de adsorção desse elemento. Sims & Bingham (1968) relataram que a illita é o mais reativo dos minerais de argila, enquanto que a

caulinita apresenta o mais baixo nível de adsorção de boro. Entretanto, existem divergências, sendo que outros autores obtiveram a seguinte ordem de reatividade: caulinita > illita > montmorilonita. Segundo Sims & Bingham (1968), o boro é mais adsorvido nas bordas do que na superfície planar dos minerais de argila.

Os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio adsorvem grandes quantidades de boro. Sims & Bingham (1968) citam que a adsorção deste elemento é específica, ocorrendo por troca de ligantes, mecanismo pelo qual o composto de boro desloca uma hidroxila da superfície do hidróxido e forma compostos covalentes. Isso ocorre tanto na superfície dos óxidos e hidróxidos como nas arestas quebradas de minerais de argila.

O papel do B na nutrição de plantas ainda é o menos conhecido dentre os nutrientes minerais, sendo que todo o conhecimento adquirido a esse respeito se originou a partir de estudos do comportamento das plantas em condições em que o B é suprimido ou ressuprido após uma deficiência (Marschner, 1995).

As funções atribuídas ao B estão relacionadas ao metabolismo de carboidratos e fenóis, transporte de açúcares através das membranas, síntese de ácidos nucleicos (DNA e RNA) e de fitohormônios, síntese, integridade e lignificação da parede celular, germinação de grão de pólen e crescimento do tubo polínico (Marschner, 1995).

De acordo com Raven (1980), a membrana do citoplasma é permeável ao ácido bórico, sendo a absorção de boro um processo passivo, ou seja, não metabólico. Com base nisso, a absorção de B é determinada pela concentração deste elemento na solução do solo e pela taxa de transpiração da planta.

Outra importante propriedade do ácido bórico é sua habilidade em formar complexos cis-diol com uma grande variedade de moléculas orgânicas, que incluem açúcares, fenóis, ácidos orgânicos e alguns polímeros. A formação de complexos açúcar-borato confere maior solubilidade aos produtos da

fotossíntese da planta, que atravessam mais facilmente as membranas celulares do que as moléculas de açúcares altamente polares, facilitando o transporte de açúcares através das membranas (Marschner, 1995). O maior requerimento de B em dicotiledôneas, comparado com gramíneas, está presumidamente relacionado a maiores proporções de compostos com configurações cis-diol na parede celular, notadamente substâncias pécticas e poligalacturônicas (Loomis & Durst, 1992).

O boro é considerado imóvel, fazendo com que seu conteúdo seja maior nos órgãos mais velhos do que nos mais novos, ou móvel somente a uma extensão limitada do floema. Esse nutriente tem a função, assim como o cálcio, de regular a síntese e a estabilidade de constituintes da parede celular, incluindo as membranas plasmáticas. Neste último caso, o efeito seria, provavelmente, pela formação de complexos cis-diol-borato com constituintes das membranas (Malavolta, 1980; Marschner, 1995).

Por exercer influência em tecidos em expansão e por possuir limitada mobilidade, o suprimento de B deve ser contínuo por toda a vida da planta, usualmente pela raiz. Sua exigência é normalmente maior para produção de sementes e grãos do que para o crescimento vegetativo das plantas, devido à sua participação no processo de fertilização, estando envolvido na germinação do grão de pólen e no crescimento do tubo polínico. Sua carência acarreta baixo pegamento da florada, má formação de grãos em cereais (chochamento de grãos) e esterilidade masculina (Faquin, 2001).

A quantidade de B requerida varia grandemente de cultura para cultura, das condições de solo, da fonte a ser usada e do método de aplicação. As doses requeridas para culturas responsivas podem causar sérios danos para culturas sensíveis.

Plantas nutricionalmente equilibradas possuem maior resistência ao ataque de fungos e pragas, como resultado de barreiras bioquímicas ou

morfológicas. O boro e o potássio são apontados como os nutrientes mais relacionados à ocorrência de doenças e pragas em plantas e os que mais favorecem o decréscimo da severidade das doenças (Marschner, 1995).

2.3 A toxidez por boro

O boro pode ser tóxico para muitas espécies de plantas em níveis extremamente pequenos acima daquele requerido para o desenvolvimento normal das plantas (Mengel & Kirkby, 1987).

Na natureza, prevalecem os solos deficientes em B; porém, solos ricos neste elemento também devem ser considerados, causando toxidez no campo e reduzindo a produção das culturas em diferentes regiões do mundo. As maiores concentrações de B de ocorrência natural são em solos derivados de evaporações marinhas e sedimentos argilosos marinhos.

Em adição, várias fontes antropogênicas com excesso de boro podem aumentar o teor deste elemento no solo a níveis tóxicos para as plantas. A mais importante fonte é a água de irrigação, mas existem outros fatores, os quais incluem resíduos provenientes de mineração superficial, resíduos minerais levados pelo vento e indústrias químicas (Nable et al., 1997).

Na região de concentração excessiva de nutrientes na planta, especialmente se apenas um elemento está presente em excesso, ocorre um efeito desfavorável ou até mesmo tóxico. Concentrações excessivas de íons alcalinos e alcalinos terrosos podem causar a perda do balanço nutricional ou outros efeitos depressivos (Larcher, 2000).

As células vegetais não podem excluir totalmente os elementos que não são necessários ou tóxicos, mesmo se forem capazes de causar injúrias. As membranas não são totalmente permeáveis ou impermeáveis aos íons. Portanto, quando há uma pronunciada diferença de concentração iônica entre dois compartimentos, ocorre passagem de íons através da membrana, seja qual for o

tipo iônico. Onde há alta concentração no meio externo, ocorrerá excesso de íons no interior das células, podendo levar à toxidez, com conseqüente prejuízo na produtividade.

Bagheri et al. (1992) estudaram a variação genética na resposta da ervilha a altas concentrações de B e identificaram respostas específicas, as quais podem ser usadas como critério de seleção em programas de melhoramento. Esses autores encontraram diferenças significativas em resposta a níveis crescentes de B entre as cultivares para produção de matéria seca, e as concentrações de B foram menores em tecidos da maioria dos cultivares tolerantes. Os tratamentos com B não afetaram a emergência, mas o peso da planta e o número de nódulos foram reduzidos e a severidade da expressão dos sintomas de toxidez aumentou com concentrações mais elevadas do elemento. A expressão dos sintomas foi a observação mais eficiente para predizer a resposta dos cultivares.

O boro talvez seja o nutriente com menor consumo de luxo, apresentando uma faixa muito estreita entre os teores de deficiência e toxidez. Os sintomas iniciais de toxidez de B incluem uma clorose internerval amarela-esverdeada, desenvolvendo-se primeiramente nas folhas velhas e estendendo progressivamente para as folhas mais jovens; coincidem com regiões das folhas onde há maior transpiração e, conseqüentemente, um aumento local na concentração do micronutriente (Malavolta, 1980).

Conforme a toxidez se torna mais pronunciada, as cloroses internervais rapidamente dão lugar a pequenas manchas de tecido necrótico amarronzado, que se desenvolvem entre as nervuras menores e se estendem para a nervura central. Necrose da margem foliar também é comum.

Poole et al. (1991), avaliando os sintomas de toxidez de B em plantas folhosas, verificaram uma larga faixa de níveis de tolerância entre estas. Algumas espécies exibiram danos foliares após uma aplicação do elemento, outras após cinco aplicações, sendo que cada aplicação possuía a mesma

concentração do elemento. Os danos e a concentração foliar de B foram descritos para cada espécie, variando também os sintomas entre estas.

Em um estudo para avaliar a interação da salinidade com a toxidez de B em trigo, Wimmer et al. (2001) observaram que, sob condições salinas, a concentração total de B aumentou nas pontas das folhas, diminuiu nas raízes e não foi afetada nas partes basais da folha. No entanto, a concentração de B solúvel nas partes basais da folha aumentou significativamente no tratamento que combinava sais com alta concentração de B comparado com o tratamento de alta concentração de B somente. Foi proposto que a salinidade interage com a toxidez de B por um efeito combinado na absorção deste elemento e água, e particionamento de B dentro da planta.

Espécies ornamentais comuns (lenhosas ou não), com diferentes teores de açúcar alcoólico, foram selecionadas por Brown et al. (1999) para testar suas respostas à toxidez de boro e pôde ser observado que espécies que não produziam açúcares alcoólicos exibiram sintomas típicos da toxidez de B incluindo a ocorrência de altas concentrações deste elemento, causando a queima das pontas e margens de folhas velhas. Nas espécies que produziam o composto, esses sintomas eram ausentes e a toxidez era expressa na morte meristemática e no acúmulo de B nos tecidos apicais. Nessas espécies, esses sintomas não tinham sido associados à toxidez de B e desde então têm sido freqüentemente diagnosticados.

Estudando a aplicação de cálcio (Ca) como uma maneira de melhorar a tolerância do kiwi à toxidez de B, Sotiroupolos et al. (1999) observaram que a presença de 12 mmol L⁻¹ de Ca na solução nutritiva diminuiu os níveis de B nas plantas significativamente, além de suavizar a toxidez por este elemento. Os altos níveis de B e Ca na solução nutritiva diminuíram as concentrações de fósforo, magnésio e zinco nas margens foliares.

Gunes et al. (1999) avaliaram o efeito de zinco (Zn) na mitigação da toxidez de B em tomate e verificaram que os sintomas de toxidez foram parcialmente reduzidos em plantas crescendo com a aplicação de Zn. Os pesos frescos e secos das plantas foram fortemente deprimidos pelo B aplicado; no entanto, tratamentos com Zn diminuíram o efeito inibitório do excesso de B no crescimento.

2.4 O silício (Si)

O silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, representando cerca de 32% em peso de todo material dos solos, e ocupando, no mundo mineral, a mesma posição de destaque que o carbono no mundo biológico.

As principais fontes de Si, que também são materiais de origem de diversos tipos de solo, incluem os minerais silicatados primários, os silicatos secundários de Al e diversas formas de sílica, SiO_2 , tais como quartzo, tridimita, cristobalita, coesita e opala.

Na fração argila, a concentração de Si depende do grau de remoção (lixiviação) de SiO_2 e de bases do perfil após a transformação (intemperismo) dos minerais silicatados de origem.

A forma predominante da sílica na solução do solo, na faixa de pH 4,0 a 9,0, é o monômero H_4SiO_4 (ácido silícico), que ocorre em concentrações variáveis de menos de 1 até mais de 100 mg dm^{-3} em SiO_2 . Valores altos são encontrados em solos arenosos e valores baixos podem ocorrer em solos tropicais altamente intemperizados. A própria química do Si reforça os argumentos a favor do H_4SiO_4 como a forma de Si solúvel em água presente nos solos (Joly, 1966).

Houve grande produção de trabalhos sobre Si em solos e plantas, notadamente gramíneas, nos anos 1960 e 70, com destaque para os pesquisadores da Universidade do Havai, em Honolulu (EUA). O recuo verificado nos anos posteriores, pelo menos até início dos anos 90, pode ser atribuído ao fato de o silício não ser reconhecido como elemento essencial às plantas (Carvalho, 1999).

As diferentes espécies de plantas variam grandemente em sua capacidade de acumular silício nos tecidos, podendo, em função das porcentagens de SiO_2 encontradas na matéria seca, ser divididas em acumuladoras (10-15% - muitas gramíneas como o arroz), intermediárias (1-5% - cereais, cana-de-açúcar) e não-acumuladoras (< 0,5% - maioria das dicotiledôneas) (Epstein, 1999).

O crescimento e a produtividade de muitas gramíneas (arroz, cana-de-açúcar, sorgo, milho, aveia, trigo, milho, grama kikuyu, grama bermuda, etc.) e algumas espécies não gramíneas (alfafa, feijão, tomate, alface e repolho) têm mostrado aumentos de produtividade com o acréscimo da disponibilidade de Si para as plantas (Korndörfer & Datnoff, 1995). Sua função em proporcionar rigidez e proteção às plantas contra patógenos e a distribuição de elementos-traço celulares é bem documentada.

Ahmad et al. (1992), estudando a função do Si na tolerância salina em trigo, observaram que a adição de 20 ppm de Si diminuiu o efeito da salinidade sobre a germinação de sementes e sobre a emergência de folhas e aumentou o número de brotações. Esse efeito benéfico do Si se explica pela sua natureza hidrofílica, protegendo as plantas da seca fisiológica. Os mesmos autores concluíram que a adição de Si na presença de NaCl diminuiu os efeitos inibitórios do sal, aumentando a produtividade das plantas, por melhorar as condições osmóticas e iônicas.

O silício é conhecido por aumentar a fertilidade dos pólenes de algumas espécies cultivadas, e, através disso, estas poderão superar os efeitos adversos de salinidade para a produção de grãos (Ahmad et al., 1992).

Dentre seus vários efeitos benéficos, o Si influencia a absorção e translocação de vários macro e micronutrientes e, freqüentemente, reduz ou elimina os efeitos adversos do excesso de metais no meio sobre as plantas, especialmente do manganês (Mn) (Epstein, 1994).

Willians & Vlanis (1957), estudando plantas de cevada (*Hordeum vulgare*), em solução nutritiva convencional com $9,1 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Mn, observaram que as folhas apresentaram manchas necróticas marrom-escuras, que desapareceram com a adição de 10 mg kg^{-1} de Si ($357 \mu\text{mol L}^{-1}$). A diminuição da produção causada pela toxidez de Mn foi, do mesmo modo, eliminada pela adição de Si. Não foi observada redução no teor total de Mn nas folhas, mas este nutriente foi melhor distribuído, não tendo sido concentrado em manchas necróticas.

A descoberta de que o Si freqüentemente confere às plantas, proteção contra toxidez de Mn levou a crer que essa função do Si se aplica a outros íons metálicos, como alumínio (Al). A forma Al^{+3} é altamente tóxica quando em concentrações elevadas, como nos solos ácidos. Por esta razão, consideráveis pesquisas realizadas por Epstein (1999) têm sido voltadas para os estudos deste metal tóxico nas plantas e a função do Si em minimizar ou eliminá-los. Interação entre Si e os metais, reduzindo a atividade dos íons metálicos tóxicos no meio, é um possível mecanismo, e a solubilidade do Si no meio é um outro. Não somente processos no substrato, mas outros ocorrendo dentro da planta, precisam ser considerados na interação entre silício e metais como manganês e alumínio (Epstein, 1999).

Li et al. (1985) encontraram que o algodão (*Gossypium hirsutum*), altamente sensível a $200 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al em solução, tem o efeito tóxico do Al diminuído por adições de silício, devido à formação de complexos Al-Si.

Além do envolvimento do silício como atenuador de estresses abióticos (Malavolta, 1980; Ahmad et al., 1992), vários trabalhos têm relatado essa mesma função em estresses bióticos (Yoshida et al., 1959; Adatia & Besford, 1993), principalmente os causados por fungos fitopatogênicos (Bélanger et al., 1995), além daqueles causados por insetos-praga (Carvalho et al., 1999; Goussain, 2001; Bassagli, 2002; Gomes, 2003).

A proteção conferida às plantas pelo silício pode ser devida ao seu acúmulo e polimerização nas células epidérmicas, como sílica amorfa abaixo da cutícula, formando uma barreira mecânica conhecida como “dupla camada silício-cutícula”, dificultando o ataque de insetos-praga e patógenos e a penetração das hifas dos fungos (Savant et al., 1997a).

Entretanto, a barreira mecânica proporcionada pela deposição do silício nas plantas não é o único mecanismo de defesa contra insetos e patógenos. Estudos com pepino demonstraram que plantas adubadas com Si tiveram suas reações de defesa contra infecção por *Phytophthora* spp mais rápidas e mais intensas do que as plantas não adubadas, promovendo uma efetiva restrição ao patógeno. Verificou-se que esta restrição estaria relacionada com a intensificação da barreira mecânica e o acúmulo de compostos fenólicos e lignina (Chérif et al., 1992).

Gomes (2003), avaliando a indução de resistência em trigo por silício e pelo pulgão *Schizaphis graminum*, concluiu que o Si induz resistência a tal praga possivelmente pela ativação da síntese de compostos de defesa da planta. Esta autora obteve essa conclusão devido à potencialização da expressão das enzimas peroxidase, polifenoloxidase e fenilalanina amônia-liase nas plantas de trigo quando adubadas com silício, além dos demais nutrientes.

2.5 Interação boro x silício

Nable et al. (1990), estudando a absorção de boro e silício por genótipos de cevada (*Hordeum vulgare*) com diferentes suscetibilidades à toxidez por B, relatam a não existência de qualquer resultado comparando a suscetibilidade à toxidez por boro e a acumulação de silício. No entanto, em experimentos independentes, realizados pelos mesmos autores, em que análises de Si eram usadas para avaliar a eficiência do uso da água em genótipos dessa mesma espécie, mostraram que genótipos com maior suscetibilidade à toxidez por B acumularam Si em maiores taxas que os genótipos menos suscetíveis. Esses pesquisadores notaram que não houve indicação de interação competitiva entre B e Si em relação à absorção, mesmo quando a concentração externa de cada um era muito alta. Algumas propriedades determinam o potencial de absorção passiva e estas, aparentemente, operam independentemente em B e Si.

Um número de propriedades similares do H_3BO_3 e H_4SiO_4 pode explicar esta associação. Por exemplo, ambos são ácidos muito fracos em solução aquosa; indissociáveis em valores fisiológicos de pH, indicando que são absorvidos como moléculas neutras, sem cargas; são considerados com movimento passivo ao longo das membranas biológicas e a acumulação de ambos pelas plantas é grandemente influenciada pelas taxas de transpiração (Raven, 1980).

Considerando a semelhança química entre o silício e o boro em seus estados fundamentais, formas similares de absorção e atuação nas plantas, fortes evidências experimentais existem relacionando a função do silício na produção das gramíneas e a essencialidade do boro, portanto, justifica-se pesquisar um sinergismo ou antagonismo dos dois elementos no arroz como subsídio à produção desta cultura.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos experimentos distintos em condições de casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, um em Neossolo Quartzarênico (RQ) e outro em Latossolo Vermelho distroférico (LVdf). Seus principais atributos químicos e físicos, antes da correção, adubação e aplicação dos tratamentos são apresentados na Tabela 1.

Nos dois experimentos, o delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, com três repetições, em esquema fatorial 5x4, sendo os fatores cinco doses de boro (0,0; 0,5; 1,5; 4,5 e 13,5 mg dm⁻³ de B) e quatro doses de silício (0,0; 0,15; 0,30 e 0,60 g dm⁻³ de Si), resultando em 60 parcelas compondo cada experimento. Como fonte de B foi utilizado o ácido bórico p.a. (H₃BO₃), e como fonte de Si, o ácido silícico p.a. (H₄SiO₄). Cada parcela experimental foi constituída por um vaso com capacidade de cinco dm³, com três plantas de arroz. As doses de B foram estabelecidas na expectativa de abranger desde os sintomas de deficiência até os de fitotoxicidade pelo micronutriente nas plantas. As doses de Si foram definidas a partir de dados da literatura, com base em experimentos anteriormente realizados com o elemento, porém, estes experimentos utilizavam silício proveniente de outras fontes, principalmente silicato de cálcio.

Os materiais de solo foram coletados na camada superficial (0-20cm) de solos provenientes da região de Itutinga - MG (RQ) e de Lavras - MG (LVdf), sendo destorroados, secos ao ar e passados em peneira com malha de 5 mm de abertura. Foram tomadas sub-amostras, às quais posteriormente foram passadas em peneira de 2 mm de abertura, constituindo a terra fina seca ao ar (TFSA), para caracterização química e textural (Tabela 1).

Foram cultivadas plantas de arroz (*Oryza sativa* L. cv. Primavera-MG) por um período referente ao ciclo desta cultivar, em torno de 4 meses, de outubro de 2002 a janeiro de 2003.

TABELA 1. Atributos químicos e textura dos solos utilizados nos experimentos sob condições naturais de ocorrência.

Atributos	Solo	
	RQ	LVdf
pH em água	5,1	4,7
P (mg dm ⁻³)	6,3	1,1
P-rem (mg L ⁻¹)	26	8
K (mg dm ⁻³)	22	32
Ca (cmol _c dm ⁻³)	0,3	0,7
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,1	0,2
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,9	1,1
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	4	9,8
SB (cmol _c dm ⁻³)	0,5	1
t (cmol _c dm ⁻³)	1,5	2,1
T (cmol _c dm ⁻³)	4,5	10,8
V (%)	9,1	10,3
m (%)	65	53
Zn (mg dm ⁻³)	0,8	0,8
Fe (mg dm ⁻³)	101,9	120,1
Mn (mg dm ⁻³)	7,7	6,4
Cu (mg dm ⁻³)	0,7	2
B (mg dm ⁻³)	0,3	0,4
S-SO ₄ ⁻² (mg dm ⁻³)	5,7	5,7
Si (mg dm ⁻³)	5,7	18,6
MO (g kg ⁻¹)	1,5	4,1
Areia (g kg ⁻¹)	92,0	15,0
Silte (g kg ⁻¹)	1,0	10,0
Argila (g kg ⁻¹)	7,0	75,0

A granulometria dos solos foi determinada pelo método da pipeta (Day, 1965).

A correção da acidez do solo foi realizada com carbonato de cálcio p.a. (CaCO_3) com base em análise química do material, para elevar a saturação por bases a 50%. A adubação básica foi feita com nitrogênio ($\text{RQ} = 90,3 \text{ mg dm}^{-3}$ e $\text{LVdf} = 135,5 \text{ mg dm}^{-3}$), fósforo ($\text{RQ} = 200 \text{ mg dm}^{-3}$ e $\text{LVdf} = 300 \text{ mg dm}^{-3}$), potássio (300 mg dm^{-3}), magnésio (30 mg dm^{-3}), enxofre (50 mg dm^{-3}), cobre ($1,5 \text{ mg dm}^{-3}$), molibdênio ($0,5 \text{ mg dm}^{-3}$), zinco (5 mg dm^{-3}) e manganês (somente o $\text{RQ} = 3 \text{ mg dm}^{-3}$). Adubações em cobertura foram realizadas conforme o desenvolvimento das plantas, tendo sido utilizados $209,68 \text{ mg dm}^{-3}$ de N vaso⁻¹ (RQ), para o $\text{LVdf} 164,52 \text{ mg dm}^{-3}$ de N vaso⁻¹ e $304,55 \text{ mg dm}^{-3}$ de K vaso⁻¹ para ambos os solos, parcelados em 3 aplicações durante o ciclo.

Os solos foram incubados por uma semana e a umidade foi mantida correspondente a 60% do volume total de poros (VTP) (Freire et al., 1980).

Após a incubação com os substratos e fertilizantes, os materiais foram avaliados quimicamente. O pH, Ca^{+2} , Mg^{+2} , Al^{+3} , P extraível e K^+ foram determinados conforme Vettori (1969) com modificações da EMBRAPA (1979), em que o pH foi determinado em água, na relação 1:2,5 (solo:água), os teores de Ca, Mg e Al foram extraídos com $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ e analisados por titulometria, e o extrator Mehlich-1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$) foi utilizado para P e K disponíveis, que foram determinados, respectivamente, por colorimetria e fotometria de chama. O Zn, o Fe, o Mn e o Cu foram extraídos por Mehlich-1 e quantificados nos extratos por espectrofotometria de absorção atômica, de acordo com metodologia proposta por Vettori (1969). O Ca^{+2} foi determinado pelo método complexométrico com EDTA, e sua quantificação feita por titulação. O S-SO_4^{-2} foi determinado de acordo com metodologia proposta pelo IAC, usando o método da colorimetria para quantificação do S disponível. A acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{+3}$) foi determinada indiretamente por meio da solução SMP e quantificada em potenciômetro, de

acordo com metodologia proposta por Raij et al. (1987). A saturação por bases foi determinada de forma indireta, através dos valores da soma de bases e da capacidade de troca de cátions a pH 7. O B foi extraído por água quente, método proposto por Berger & Truog (1939). O silício solúvel nos solos foi determinado de acordo com método proposto por Mc Keague & Cline (1963). A extração do elemento compreendeu a agitação de 10 cm³ de TFSA (terra fina seca ao ar) com 100 mL de água destilada por 5 minutos em frascos plásticos, seguida de repouso por 10 horas e separação da suspensão de solo por filtração. A dosagem foi feita por leituras colorimétricas (810 nm) em alíquotas de 100 mL contendo, além do extrato, soluções de ácido tartárico, sulfo-molibídica e de ácido ascórbico. Os teores de Si solúvel em água foram calculados com base em curva padrão preparada com ácido silícico.

Os atributos químicos dos solos após a aplicação dos tratamentos estão dispostos nas tabelas 2 e 3.

Durante o ciclo da cultura foram avaliados a altura de plantas e o número de perfilhos. No final do ciclo, as plantas foram colhidas e separadas em grãos, folhas + colmo e raiz. Todo material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de 65-70°C, e pesado, obtendo-se, assim, o rendimento em matéria seca. Posteriormente, foram avaliados os componentes de produção (número de panículas vaso⁻¹, número de grãos panícula⁻¹ vaso⁻¹, % de grãos cheios vaso⁻¹ e peso de 100 grãos vaso⁻¹). A seguir, o material vegetal (grãos e parte aérea = folha+colmo, separadamente) foi moído em moinho tipo Willey e submetido à análise química para determinação dos teores de B e Si. O teor de B foi determinado pela digestão via seca em forno de mufla a 550°C (incineração) e determinação colorimétrica com o uso de azometina-H (Malavolta et al., 1997). A análise de silício nos tecidos vegetais foi realizada segundo método proposto por Gallo & Furlani (1978), envolvendo três etapas em sua extração: (a) incineração do material a 500°C por 30 minutos em cadinho



de níquel; (b) dissolução do SiO_2 com solução de NaOH a 10% e novo aquecimento nas mesmas condições por 20 minutos; e (c) dissolução do silicato de sódio (Na_2SiO_3) formado com água destilada no próprio cadinho. O extrato final foi obtido transferindo-se alíquotas variáveis de 1 a 5 mL dos cadinhos para recipientes plásticos com volume final completado com água destilada para 50 mL. A dosagem de Si foi feita por leituras colorimétricas (810 nm) em alíquotas de 50 mL contendo, além do extrato, soluções de H_2SO_4 , molibdato de amônio, ácido oxálico e ácido ascórbico, tendo os teores de Si sido calculados com base em curva padrão preparada com ácido silícico, sendo em seguida corrigidos para teor de Si na matéria seca de grãos e de parte aérea (Gallo & Furlani, 1978).

TABELA 2: Atributos químicos do RQ após a aplicação dos tratamentos.

Dose de B mg dm ³	Dose de Si g dm ³	pH H ₂ O	P rem mg L ⁻¹	K mg dm ³	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S-SO ₄ ²⁻	Si	
----- cmol _c dm ³ -----											----- mg dm ³ -----										
----- % -----																					
0	0	5,1	42,2	54,3	108	1,7	0,2	0,3	2,9	2,2	2,5	5,1	49,2	12	4,5	72,1	11,7	1,3	0,3	61,2	5,7
	0,15	5,1	39,8	45,1	127	1,5	1,2	0,4	2,9	3,0	3,4	5,9	51,0	12	5,6	71,9	11,0	0,7	0,2	65,2	9,6
	0,30	5,2	39,8	59,0	133	2,2	0,5	0,2	2,9	3,0	3,2	5,9	51,2	6	7,3	74,7	14,3	2,4	0,2	65,2	17,4
0,5	0,60	5,3	39,8	54,3	150	2,0	0,3	0,2	2,6	2,7	2,9	5,3	50,8	7	3,9	73,6	13,2	1,1	0,3	69,6	21,8
	0	5,1	39,8	41,1	92	1,6	0,8	0,3	2,9	2,6	2,9	5,5	47,7	10	3,0	70,8	15,6	1,0	0,6	56,0	6,5
	0,15	5,6	39,8	93,3	158	1,7	0,8	0,1	2,3	2,9	3,0	5,2	55,8	3	3,0	71,8	11,7	3,3	0,4	54,4	13,7
1,5	0,30	5,5	38,7	60,2	158	1,3	1,3	0,2	2,6	3,0	3,2	5,6	53,6	6	9,5	74,7	11,7	3,6	0,6	74,6	14,2
	0,60	5,5	38,7	60,2	145	1,6	0,4	0,2	2,3	2,4	2,6	4,7	50,7	8	4,1	72,9	11,7	1,0	0,5	61,2	15,5
	0	5,6	39,8	114,3	156	1,4	0,8	0,1	2,3	2,6	2,7	4,9	53,1	4	4,8	75,0	15,1	1,1	1,2	63,2	6,5
4,5	0,15	5,8	41,0	109,0	120	1,4	0,8	0,1	2,3	2,5	2,6	4,8	52,2	4	11,1	67,9	13,4	1,1	1,3	56,0	11,5
	0,30	5,7	38,7	52,5	100	1,5	0,9	0,1	2,3	2,7	2,8	5,0	53,6	4	8,3	72,5	12,1	0,8	1,3	63,2	12,4
	0,60	5,8	39,8	65,4	116	1,2	0,3	0,1	2,3	1,8	1,9	4,1	48,9	5	2,4	70,1	11,1	1,0	1,0	56,0	14,5
13,5	0	6,0	39,8	98,5	124	1,4	0,9	0,1	2,3	2,6	2,7	4,9	53,3	4	13,2	66,4	11,7	1,0	3,8	63,2	5,4
	0,15	6,0	39,8	0	172	1,3	0,3	0,1	2,3	2,0	2,1	4,3	47,0	5	2,6	59,0	11,5	0,8	4,2	56,0	10,9
	0,30	5,9	39,8	98,5	156	1,4	0,4	0,1	2,3	2,2	2,3	4,5	48,9	4	4,6	57,4	11,6	1,5	4,1	65,2	11,4
10,9	0,60	5,8	39,8	47,1	125	1,7	0,2	0,1	2,1	2,2	2,3	4,3	51,4	4	6,9	56,9	12,0	0,9	3,9	61,2	15,8
	0	5,7	37,7	43,4	131	1,6	0,3	0,1	2,3	2,2	2,3	4,5	49,3	4	3,2	60,9	11,6	3,4	8,3	57,7	5,2
	0,15	5,8	38,7	88,2	142	1,4	0,4	0,1	2,3	2,2	2,3	4,5	48,4	4	3,2	68,1	15,6	1,0	8,7	57,7	9,1
9,1	0,30	5,6	42,2	36,8	152	1,4	0,8	0,1	2,1	2,6	2,7	4,7	55,2	4	5,3	60,3	11,8	0,6	9,2	77,4	9,1
	0,60	5,9	39,8	37,8	152	1,4	0,7	0,1	3,2	2,5	2,6	5,7	48,8	4	2,9	64,1	11,1	0,5	8,9	67,3	10,9

TABELA 3: Atributos químicos do LVdf após a aplicação dos tratamentos.

Dose de B	Dose de Si	pH H ₂ O	P rem	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S-SO ₄ ⁻²	Si
mg dm ⁻³	g dm ⁻³		Mg L ⁻¹	mg dm ⁻³		cmol. dm ⁻¹				%		mg dm ⁻³									
0	0	6,0	22,3	55,5	183	1,4	0,8	0,1	3,2	5,6	5,7	8,8	63,5	2	10,2	107,4	10,7	2,2	0,4	74,6	18,6
	0,15	5,9	23,7	55,5	152	1,4	1,0	0,1	3,2	5,4	5,5	8,6	62,7	2	6,7	102,8	9,5	2,4	0,4	80,4	25,2
	0,30	5,9	23,0	60,2	169	4,3	0,8	0,1	3,2	5,4	5,5	8,6	62,9	2	8,2	110,3	10,4	2,5	0,3	77,4	41,0
	0,60	5,9	23,7	42,3	147	4,0	0,2	0,1	3,2	4,9	5,0	8,1	60,4	2	5,8	103,2	9,8	2,6	0,2	74,6	49,2
0,5	0	6,0	24,4	57,0	164	4,2	0,4	0,1	3,2	4,9	5,0	8,1	60,6	2	6,3	105,1	9,2	2,4	0,6	74,6	18,6
	0,15	5,9	22,3	51,1	161	4,3	0,3	0,1	3,2	4,9	5,0	8,1	60,5	2	5,7	107,2	9,4	2,1	0,5	74,6	21,3
	0,30	5,9	23,0	60,2	210	4,1	0,4	0,1	3,2	5,0	5,1	8,2	61,2	2	10,1	105,3	10,0	2,5	0,5	73,4	36,6
	0,60	5,9	23,7	61,9	199	4,2	0,3	0,1	3,2	5,0	5,1	8,2	61,0	2	4,9	105,0	9,1	2,5	0,4	72,0	45,9
1,5	0	5,9	21,1	40,0	120	4,6	0,8	0,1	3,2	5,7	5,8	8,9	64,1	2	7,9	114,8	10,2	2,4	1,3	59,4	17,5
	0,15	6,0	24,4	82,6	174	4,0	1,0	0,1	3,2	5,5	5,6	8,7	63,0	2	5,7	103,2	9,4	2,4	1,1	72,0	25,7
	0,30	5,9	23,0	54,0	180	4,1	0,9	0,1	3,2	5,5	5,6	8,7	63,0	2	6,0	99,3	10,0	3,4	0,9	80,4	32,5
	0,60	6,0	23,7	40,0	138	3,7	0,3	0,1	3,6	4,3	4,4	7,9	54,7	2	7,0	115,0	9,7	2,3	0,9	63,2	54,2
4,5	0	6,0	21,7	38,9	136	3,9	0,4	0,1	3,2	4,7	4,8	7,9	59,2	2	5,6	105,6	10,6	2,4	2,3	57,7	16,7
	0,15	6,2	19,4	28,1	113	3,7	0,8	0,1	2,6	4,8	4,9	7,4	64,8	2	5,4	110,1	10,2	2,0	2,8	54,4	25,2
	0,30	6,2	22,3	52,5	139	3,3	0,6	0,1	2,9	4,3	4,4	7,2	59,5	2	5,5	108,2	9,9	2,5	2,9	56,0	38,6
	0,60	6,2	21,7	35,7	138	3,4	0,6	0,1	2,9	4,3	4,3	7,2	59,4	2	4,5	104,0	9,1	2,3	3,1	56,0	49,2
13,5	0	6,1	23,0	42,3	124	3,7	0,7	0,1	2,9	4,7	4,8	7,6	61,9	2	5,9	125,1	8,4	2,0	7,9	52,9	14,8
	0,15	6,1	23,0	69,2	172	3,8	1,1	0,1	2,9	5,3	5,4	8,2	64,8	2	10,5	119,3	8,2	2,1	8,3	65,2	27,1
	0,30	6,0	23,0	40,0	131	3,9	0,2	0,1	2,9	4,4	4,5	7,3	60,5	2	6,9	100,5	8,2	2,4	7,8	63,2	37,7
	0,60	6,4	23,7	48,4	147	3,8	0,5	0,1	3,2	4,7	4,8	7,9	59,4	2	5,9	95,0	7,3	2,3	8,1	65,2	53,9

O efeito dos tratamentos foi avaliado estatisticamente por meio da análise de variância, sendo feita uma análise para cada experimento, após feitos os testes de invariabilidade das variâncias, ou homocedastia (Teste de Barlett e Teste de Levene) e de normalidade dos dados (Teste de Shapiro Wilks).

Além das análises de variância, foram realizados estudos de regressão para as variáveis de produção e teste de médias (Teste de Tukey) para os teores e conteúdos de nutrientes nos tecidos vegetais. Os modelos de regressão testados foram o linear e o quadrático. A escolha dos modelos mais adequados obedeceu aos seguintes critérios: significância dos coeficientes de regressão pelo teste "t" de Student e comparação dos coeficientes de determinação ajustados. As variáveis foram submetidas a análise de variância, estudos de regressão e teste de médias, sendo utilizado, nessa fase, o programa estatístico SISVAR.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Neossolo Quartzarênico (RQ)

O resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) dos componentes de produção: matéria seca de grãos (MSGr), matéria seca de parte aérea (MSPA), matéria seca de raízes (MSR), número de perfilhos (PERF) e altura de plantas (ALT), e dos componentes de produção de grãos: número de panículas vaso⁻¹ (PAN), número de grãos panícula⁻¹ vaso⁻¹ (GrPAN), porcentagem de grãos cheios vaso⁻¹ (PGrC) e peso de cem grãos vaso⁻¹ (PCGr), é apresentado na Tabela 4.

TABELA 4: Resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) do experimento realizado no solo Neossolo Quartzarênico.

Variáveis	CV (%)	Quadrado médio das fontes de variação		
		Doses de B	Doses de Si	B * Si
MSGr	8,45	116,0456 **	106,1719 **	31,4345 ^{NS}
MSPA	6,67	114,2359 **	20,8995 ^{NS}	30,1736 ^{NS}
MSR	17,31	294,7279 **	48,2450 ^{NS}	51,6875 ^{NS}
PERF	8,80	25,9333 *	0,4166 ^{NS}	9,4444 ^{NS}
ALT	5,23	37,9798 ^{NS}	21,1215 ^{NS}	33,8626 ^{NS}
PAN	8,36	87,3166 **	10,4444 ^{NS}	3,2500 ^{NS}
GrPAN	9,87	389,4583 *	137,7944 ^{NS}	73,2250 ^{NS}
PGrC	12,16	143,7597 ^{NS}	48,2859 ^{NS}	46,6969 ^{NS}
PCGr	5,24	0,0366 *	0,0105 ^{NS}	0,0140 ^{NS}

*, **, NS – significativo a 5%, a 1% e não significativo, respectivamente.

MSGr (Matéria Seca de Grãos), MSPA (Matéria Seca de Parte Aérea), MSR (Matéria Seca de Raízes), PERF (Número de Perfilhos), ALT (Altura de Plantas), PAN (Número de Panículas vaso⁻¹), GrPAN (Número de Grãos Panícula⁻¹ vaso⁻¹), PGrC (Porcentagem de Grãos Cheios vaso⁻¹) e PCGr (Peso de Cem Grãos vaso⁻¹).

4.1.1 Matéria seca de grãos

A análise de variância para matéria seca de grãos (MSGr) mostrou que as doses de B e as doses de Si influenciaram significativamente ($P < 0,01$) essa variável. Esses resultados refletem o efeito da disponibilidade de nutrientes no desenvolvimento das plantas, mostrando variação de resposta das plantas às doses de B e às doses de Si.

Para as doses de B, a equação quadrática foi a que melhor se ajustou à MSGr (Figura 1). Verifica-se, por meio do modelo, que houve aumentos na produção de matéria seca de grãos com a aplicação das menores doses de B ($0,5$ e $1,5 \text{ mg dm}^{-3}$), havendo maior translocação de carboidratos das folhas para os grãos. A partir da aplicação da dose de $4,34 \text{ mg dm}^{-3}$ de B ocorreu redução na produção de matéria seca de grãos. As menores produções de MSGr foram as obtidas na ausência de aplicação do micronutriente e na aplicação das maiores doses, indicando, respectivamente, efeitos de deficiência e toxidez nas plantas de arroz às doses de B testadas, sendo esses efeitos justificados pelo aparecimento de sintomas típicos de carência e excesso do nutriente nas plantas.

Os sintomas de deficiência de boro se manifestam nas folhas jovens que ficam enrugadas, deformadas e espessas e, juntamente com as hastes, tornam-se quebradiças. À medida que os sintomas progridem, o ponto de crescimento terminal morre e a formação de flores e frutos é prejudicada ou inibida. O desenvolvimento do sistema radicular também pode ser afetado (Mengel & Kirkby, 1987).

Em plantas deficientes em B, ocorre a ativação da via das pentoses-fosfato, uma via alternativa da glicólise na degradação de carboidratos, fazendo com que haja um acúmulo dos produtos gerados, dentre eles os fenóis, que são fitotóxicos em níveis elevados. Tem sido proposto que a causa primária das necroses, observadas nos tecidos em plantas deficientes em B, está associada com o acúmulo de fenóis e auxinas (Faquin, 2001).

Uma outra consequência é o chochamento de grãos, ou seja, a ausência de grãos na panícula, que tem como causa a esterilidade masculina, refletindo de forma negativa na produtividade da cultura, levando a uma produção de MSGr inferior àquela quando o solo é adubado adequadamente com boro. Não está claro em que níveis deste nutriente na planta este fenômeno se manifesta, e são vários os fatores que o influenciam, já que o B desempenha papel importante no controle do mesmo (Assis, 1997).

O boro pode não ter grande influência na produção vegetativa, porém pode ser limitante na produção de grãos, uma vez que a deficiência deste nutriente reduz o número de flores férteis, reduz o número de pólenes e, portanto, causa menor produção de matéria seca de grãos (Marschner, 1995). Este micronutriente apresenta importante papel na expressão da máxima capacidade produtiva do algodoeiro, pois apresenta uma participação expressiva na retenção de estruturas florais (Costa, 2001).

Quando o boro se encontra em níveis de deficiência, a divisão celular não chega a ser completada e as paredes longitudinais das células têm sua formação comprometida, resultando em uma expansão irregular e incompleta dos tecidos foliares (Dell et al., 1997). Estes autores supõem que a deficiência de B prejudica a expansão celular, inclusive mudanças no comprimento e na largura das células. O desenvolvimento estrutural anormal da parede celular causado pela deficiência de B pode ser relatado como uma redução drástica da plasticidade da parede celular, conduzindo a um colapso na expansão das células recém divididas.

Bouchadert (2002), analisando o crescimento, as características físicas e anatômicas da madeira juvenil de clones de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação de boro, verificou que os clones estudados responderam de maneira diferenciada em produção de madeira, sendo que a aplicação desse nutriente

proporcionou maiores ganhos nesta variável. As doses de boro não tiveram efeito significativo sobre a densidade e as características anatômicas da madeira.

A produção de MSGr foi reduzida em resposta às doses mais altas de B, indicando efeito tóxico, já que para este micronutriente a faixa entre o limite de tolerância e o de toxidez é muito estreita (Gupta, 1979; Mengel & Kirkby, 1987; Bergmann, 1992; Marschner, 1995) e compromete a produção.

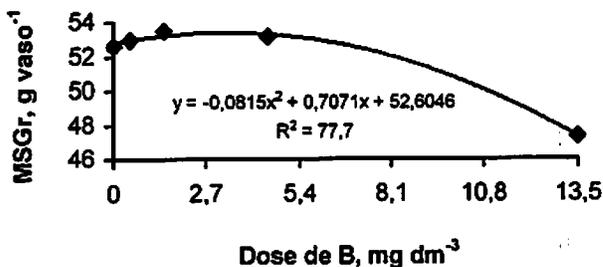


FIGURA 1: Produção de matéria seca de grãos (MSGr) de arroz em função das doses de B aplicadas no Neossolo Quartzarênico.

Assim, em razão dos resultados obtidos, a produção de grãos de arroz, quando cultivados em solos com baixa disponibilidade deste nutriente, assim como sob aplicação de doses elevadas, será afetada de modo negativo.

De acordo com a Lei dos Incrementos Decrescentes ou Lei de Mitscherlich, o maior incremento em produção é obtido com a primeira dose, quando são adicionadas doses crescentes de um nutriente; com aplicações sucessivas do nutriente, os incrementos de produção são cada vez menores, fator importante no aspecto econômico. Considerando tal fato, a partir da equação da Figura 1, foram estimados valores de 54,14 e 48,72 g vaso⁻¹, respectivamente, para a produção de MSGr, correspondente à produção máxima e a 90 % da máxima, a qual, de acordo com Alvarez V. et al. (1988), representa a máxima eficiência econômica.

Para a dose de B correspondente à produção máxima e à 90 % da máxima, foram estimados valores de 4,34 e 3,82 mg dm⁻³, respectivamente.

A dose de B correspondente a 90 % da máxima MSGr indica uma redução de 11,98 % da dose necessária para se atingir a produção máxima e essa redução na dose do nutriente é acompanhada de uma redução de 10 % na produção, o que indica uma apreciável economia com a adubação e redução da relação custo/benefício. Por outro lado, doses acima de 4,34 mg dm⁻³ de B nesse solo causam severos danos à produção do arroz.

Em relação às doses de silício, a produção de MSGr aumenta, respondendo a incrementos das doses deste elemento (Figura 2). Esses resultados induzem à inferência de que o Si foi capaz de incrementar a produção de MSGr das plantas à medida que forem aumentadas as doses do elemento. Sabe-se que o silício proporciona um aumento na fertilidade dos pólenes, participando dos estágios de desenvolvimento e frutificação das plantas (Ponnamperuma, 1964; Myiake & Takahashi, 1983; Epstein, 1994; Barbosa Filho, 2000). Entretanto, isso deve ser analisado cuidadosamente, visto que o silício não é considerado essencial, mas útil aos vegetais, notadamente gramíneas (Chen & Lewin, 1968; McNaughton et al., 1985; Ahmad et al., 1992; Marschner, 1995; Korndörfer & Datnoff, 1995; Exley, 1998; Neumann & Figueiredo, 2002; Sussman & Richmond, 2003).

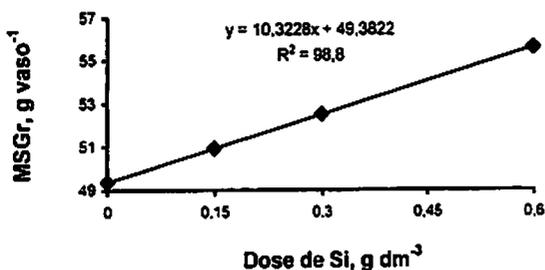


FIGURA 2: Produção de matéria seca de grãos (MSGr) de arroz em função das doses de Si aplicadas no Neossolo Quartzarênico.

Embora seja considerado o Si um elemento não-essencial para a maioria das plantas, os benefícios deste elemento incluem aumento na resistência à pragas e patógenos, na tolerância à seca e metais pesados e na qualidade e produtividade das culturas agrícolas (Sussman & Richmond, 2003), o que pode explicar os resultados obtidos no presente trabalho.

Savant et al. (1997b) observaram que reduções nos teores de Si disponíveis às plantas de arroz em crescimento poderiam ser um possível fator limitante, contribuindo para o declínio ou estagnação da produção dessa cultura. Savant et al. (1997a) promoveram uma ampla revisão de literatura documentando o impacto positivo de aplicações de silício nas produções de grãos de arroz sob condições tropicais e subtropicais. Nesta revisão são encontrados vários níveis de aumento de produção da cultura. Um experimento reportou aumentos de 10 a 30 %. Em outro estudo, as produções aumentaram em mais de 500 kg.ha⁻¹. E ainda, outras pesquisas mostraram um aumento de 4,6 a 20,7 % na produção de grãos de arroz quando realizadas adubações silicatadas.

Alvarez & Datnof (2001) relatam serem claras as evidências de que aplicações de Si têm impactos benéficos na produção de grãos de arroz em muitas áreas do mundo e que o uso deste elemento pode reduzir o regime de

fertilização prévia (devido à redução de aplicações de P e de calcário), resultando em custos reduzidos e efeitos benéficos ao meio ambiente.

Ressalta-se que, no presente estudo, a aplicação de silício apresentou efeito linear na produção de grãos pelas plantas de arroz, embora se destaque que não foi possível obter a produção máxima com as doses aplicadas (Figura 2).

4.1.2 Matéria seca de parte aérea (MSPA), matéria seca de raiz (MSR), número de perfilhos (PERF), número de panículas (PAN) e número de grãos por panícula (GrPAN)

A análise de variância para matéria seca de parte aérea (MSPA), matéria seca de raiz (MSR), número de perfilhos (PERF), número de panículas (PAN) e número de grãos por panícula (GrPAN) mostrou que as doses de B influenciaram significativamente essas variáveis.

A resposta encontrada não era esperada, visto que o solo utilizado neste experimento, em condições de fertilidade natural, apresenta teor de B considerado pertencente à faixa de baixa disponibilidade deste micronutriente no solo, de 0,16 a 0,35 mg dm⁻³ de B, em água quente, para o desenvolvimento das culturas em geral (CFSEMG, 1999).

Estes resultados confirmam um fato muito comentado de que a fixação de níveis para nutrientes no solo não é válida para todas as culturas e tipos de solos. De acordo com Gupta (1979), para certos elementos, o limite entre deficiência e suficiência, e até mesmo toxidez, é muito próximo e determinados valores considerados como baixos em alguns trabalhos podem não ser em outros em condições semelhantes. Um outro fato que deve ser levado em consideração é que as gramíneas possuem baixa exigência de boro em relação às dicotiledôneas (Bergmann, 1992).

Para essas variáveis, as equações lineares decrescentes foram as que melhor se ajustaram (Figura 3). O modelo evidencia reduções nas produções com a aplicação de B.

Foi constatado que o teor de B disponível no solo natural ($0,3 \text{ mg dm}^{-3}$ de B) era suficiente para o crescimento do arroz nesse solo, sendo que, aplicações com o nutriente levaram à redução dessas variáveis.

O comprometimento nas produções pode ser justificado pela toxicidade de B, de acordo com o aparecimento de sintomas típicos de excesso do nutriente nas plantas. Os sintomas foram manifestados com bastante intensidade e de maneira generalizada e se apresentaram inicialmente com uma clorose internerval amarela-esverdeada, desenvolvendo primeiramente nas folhas velhas e se estendendo progressivamente para as folhas mais jovens, coincidindo com regiões das folhas onde há maior transpiração.

O transporte de boro da solução do solo até a raiz ocorre principalmente por fluxo de massa, portanto, esse micronutriente será absorvido sempre que estiver na solução nutritiva ou na solução do solo. Não existem mecanismos de controle da sua absorção, havendo, portanto, grandes possibilidades de ocorrer algum efeito deletério nos vegetais devido à toxicidade deste micronutriente (Mengel & Kirkby, 1987)

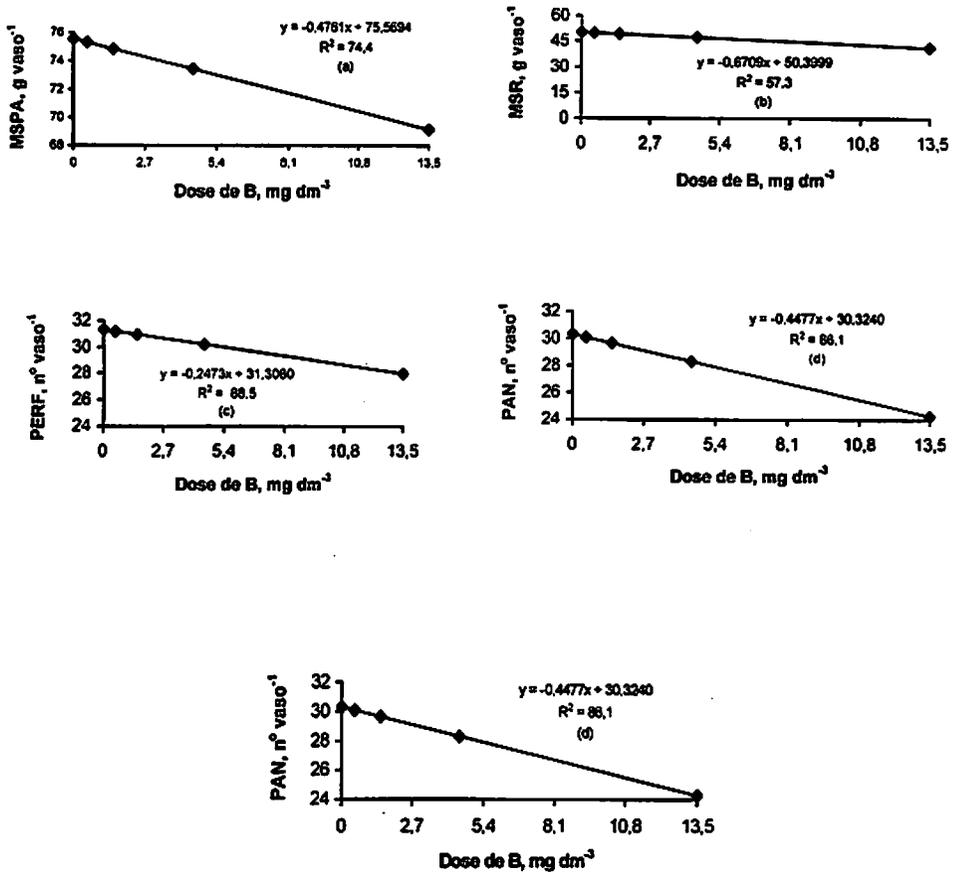


FIGURA 3: Matéria seca de parte aérea (MSPA) (a), matéria seca de raiz (MSR) (b), número de perfilhos (PERF) (c), número de panículas (PAN) (d) e número de grãos por panícula (GrPAN) (e) em função das doses de B aplicadas no Neossolo Quartzarênico.

Segundo Paull et al. (1992), a toxicidade do B e os mecanismos de tolerância das plantas a esse nutriente ainda não são bem entendidos. Os autores citam alguns possíveis mecanismos de tolerância ao excesso de B: exclusão no processo de absorção pelas raízes, translocação reduzida das raízes para a parte aérea e desenvolvimento de um sistema radicular mais superficial, de forma a evitar ambientes de maior concentração de B.

Estudando a variação genética da resposta de plantas de ervilha a altas concentrações de B no solo, Bagheri et al. (1992) utilizaram nove cultivares australianas cultivadas em solos contendo 5 níveis de B (0, 10, 20, 30 e 40 mg kg⁻¹) e observaram diferenças significativas em respostas aos aumentos dos níveis de B para produção de matéria seca, sendo que concentrações de B foram menores nos tecidos da maioria das cultivares tolerantes. Os tratamentos com B não afetaram a emergência, porém, a altura das plantas e o número de nódulos foram reduzidos e a severidade da expressão dos sintomas de toxidez de B aumentou com as maiores doses. A expressão dos sintomas foi a observação mais eficiente para prever a resposta dos cultivares, determinada pela produção de matéria seca e pela concentração de B nos tecidos, e correlações altamente significativas foram encontradas entre os sintomas e essas medidas.

Tratando-se da toxidez por B, a tolerância de plantas expostas a essa condição se dá em termos de órgãos e células. Em relação às raízes, genótipos classificados como suscetíveis, em experimentos de campo e de casa de vegetação, produziram raízes axiais mais curtas, além da menor produção de raízes laterais, em relação a genótipos tolerantes, em meios com altas concentrações de B (Nable et al., 1997), mostrando estreita relação entre produção de MSR e teores de B no solo.

Os sintomas de excesso coincidem com regiões da folha onde há maior transpiração e, conseqüentemente, aumento local na concentração de B no tecido foliar. Em geral, nas regiões da folha onde não aparecem anormalidades visíveis,

a concentração de B não chega a 100 mg kg^{-1} ; é de $100\text{-}150 \text{ mg kg}^{-1}$ nos sítios onde há clorose malhada, sendo maior que 1500 mg kg^{-1} nas áreas necrosadas. O teor tido como tóxico varia com a espécie a ser considerada (Malavolta, 1980).

Segundo Bergmann (1992), para o arroz, os teores adequados de B na matéria seca dessas plantas estão entre 6 e 15 mg kg^{-1} . Este autor comenta que o peso seco da parte aérea, o número de perfilhos e o peso seco dos grãos são reduzidos na presença de teores de B excedendo 130 mg kg^{-1} , entretanto, esse autor cita que a toxidez de B também pode ocorrer se o teor se situar entre 20 e 50 mg kg^{-1} na matéria seca da folha.

Kalayci et al. (1997) estudaram respostas de cultivares de trigo à toxidez de B em experimentos realizados no campo e em casa de vegetação e obtiveram correlações significativas entre sintomas de toxidez e produção de grãos. Os autores observaram que as cultivares tolerantes foram aquelas selecionadas na população local, onde existem quantidades tóxicas de B extraído em água. O efeito prejudicial do B na produção de matéria seca de raiz foi muito maior em relação à matéria seca de parte aérea, 45 e 26% , respectivamente. Enquanto isso implica no possível mecanismo de redução da translocação, altas concentrações de B são encontradas nos tecidos de plantas tolerantes e baixas concentrações nos de cultivares sensíveis, indicando a existência de outros mecanismos favoráveis, como a tolerância dos próprios tecidos. Kalayci et al. (1997) verificaram ainda que, em alguns casos, a absorção reduzida do micronutriente pode ser mais importante que a translocação reduzida.

A nutrição com B é afetada por diversos fatores, podendo esses interferir na produção das culturas devido a problemas por deficiência ou toxidez em relação ao nutriente. Tratando-se da textura, teores de B disponíveis às plantas podem ser rapidamente lixiviados do solo por chuvas excessivas ou mesmo irrigação. Menor lixiviação ocorre em solos de textura fina; assim, solos siltosos ou argilosos não apresentam tantos problemas com o nutriente como os

arenosos. A matéria orgânica é também um fator importante, sendo talvez o constituinte dos solos que mais afeta a disponibilidade de B para as plantas, principalmente por adsorver mais boro com base em peso do que os constituintes minerais, sendo a fonte primária de B disponível às plantas. Este micronutriente pode ligar-se a diversos compostos como xilose, manose, glucose e galactose, que são formados à medida que ocorre decomposição da matéria orgânica (Parks & White, 1952). A troca de ligantes parece ser o mecanismo de adsorção de B a compostos orgânicos. Este nutriente é liberado para as plantas por meio da ação de microrganismos, e quando as plantas são cultivadas em solos com baixo teor de matéria orgânica, como no caso deste estudo, há necessidade de constante reposição deste nutriente.

Em relação ao pH, o aumento deste diminui a disponibilidade de B para as plantas (Heckman, 2002).

A resposta à aplicação de B sofre grande influência do tipo de solo, conforme relata Costa (2001), uma vez que solos mais argilosos adsorvem mais e disponibilizam menos o nutriente que solos arenosos, pois a predominância de hidróxidos de alumínio em solos argilosos faz com que estes apresentem maior capacidade de fixação deste elemento, formando compostos insolúveis. Quanto menor é o teor de argila, maior é a atividade do boro, de modo que a produção das culturas responde à atividade do B na solução do solo e não ao B adsorvido, fazendo com que seja maior a probabilidade de ocorrência de toxidez por B em solos arenosos, conforme observado neste experimento, em relação aos solos argilosos (Sims & Bingham, 1967). Keren et al. (1985) relatam que a quantidade de B extraída pelas plantas é maior nos solos mais arenosos.

4.1.3 Peso de cem grãos (PCGr)

Em relação ao peso de cem grãos (PCGr), foi observado um comportamento inverso ao anteriormente discutido, ou seja, à medida que foram aumentadas as doses de B aplicadas no solo, foi notado um acréscimo no peso de grãos de arroz (Figura 4).

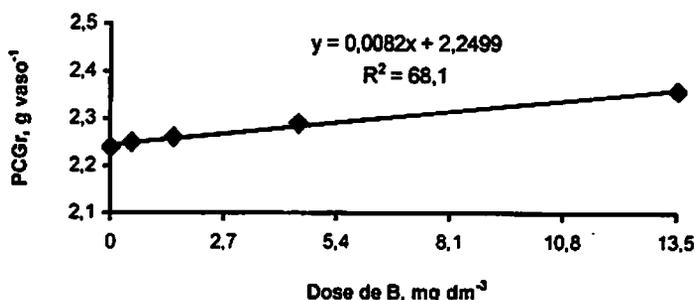


FIGURA 4: Peso de cem grãos (PCGr) de arroz em função das doses de B aplicadas no Neossolo Quartzarênico.

Os resultados mostram que, apesar do número de grãos por panícula ter sido reduzido após aplicação das doses de B, conforme Figura 3 (d), o peso de cem grãos aumentou (Figura 4).

Assim, foi constatado neste estudo que a exigência pelo boro é normalmente maior para produção de sementes e grãos do que para o crescimento vegetativo das plantas. Certamente, este comportamento é devido à participação do B no processo de fertilização, estando envolvido ainda na germinação do grão de pólen e no crescimento do tubo polínico. Sua carência acarreta em baixo pegamento da florada, má formação de grãos em cereais (chochamento de grãos) e esterilidade masculina (Nable et al., 1997; Eguchi, 2000; Davis et al., 2003).

O boro tem pouco efeito no desenvolvimento vegetativo, assim, um baixo teor no solo pode ser suficiente para que a exigência para as funções desempenhadas por este micronutriente, relacionadas com o desenvolvimento vegetativo, seja adequadamente suprida. Um efeito indireto deste micronutriente, nesse caso, seria uma menor produção de grãos por planta; porém, uma maior quantidade de fotossintatos para o desenvolvimento dos mesmos, resultando em um maior peso dos grãos (Castro, 1999).

Apesar da interação entre o boro e o silício não ter sido significativa, a adubação silicatada pode ter auxiliado no aumento do peso dos grãos, sabendo-se que este elemento proporciona um aumento na fertilidade dos pólenes, participando dos estágios de desenvolvimento e frutificação das plantas (Ponnamperuma, 1964; Myiake & Takahashi, 1983; Epstein, 1994; Barbosa Filho, 2000).

4.1.4 Teor de boro em grãos e na parte aérea

O teor de B nos grãos (TBGr) de arroz foi menor com a aplicação das menores doses de B (0,5 e 1,5 mg dm⁻³) (Tabela 5), e aumentou com o incremento das doses do nutriente. Nota-se que ocorreu o inverso do que foi observado com os dados de produção de matéria seca de grãos (MSGr), ou seja, a MSGr sofreu incrementos até a aplicação de 4,32 mg dm⁻³ de B, sendo reduzida após a aplicação de doses maiores.

TABELA 5: Teor de boro em grãos e na parte aérea de plantas de arroz cultivadas no Neossolo Quartzarênico

B NO GRÃO					
Doses de Si (g dm ⁻³)	Doses de B				
	mg dm ⁻³				
	0	0,5	1,5	4,5	13,5
	mg kg ⁻¹				
0	13,7	7,2	9,6	15,2	25,9
0,15	9,8	6,6	10,5	9,9	14,5
0,30	11,6	6,6	7,9	8,1	13,7
0,60	5,5	4,9	7,5	8,9	10,2
DMS Boro			4,6		
B NA PARTE AÉREA					
Doses de Si (g dm ⁻³)	Doses de B				
	mg dm ⁻³				
	0	0,5	1,5	4,5	13,5
	mg kg ⁻¹				
0	31,3	29,4	33,7	36,3	33,9
0,15	30,3	27,9	35,3	38,8	44,9
0,30	30,2	34,0	31,7	34,1	46,9
0,60	27,6	30,8	34,7	24,9	42,2
DMS Boro			5,7		

Essa resposta era esperada sabendo-se que, conforme há maior produção de matéria seca de grãos, os teores do nutriente na parte analisada são reduzidos, em função do efeito de diluição. Posteriormente houve queda na produção de MSGr, e conseqüentemente um novo aumento no teor de B em razão do efeito de concentração, levando as plantas à toxidez. Ocorreu absorção de quantidade crescente de B acarretando em resposta negativa à produção de grãos, existindo um consumo de boro além das necessidades da planta.

Em relação aos dados de teor de B na parte aérea (folha + colmo) (TBPA) observados na tabela 5, estes mostram que o teor do nutriente aumentou com a aplicação das doses de B, reduzindo a produção de matéria seca de parte aérea, indicando novamente efeito de concentração. Os dados coincidiram com os sintomas de toxidez apresentados pelas plantas e conseqüente redução na

produção de matéria seca de parte aérea com a aplicação do micronutriente (Figura 3).

Existem discordâncias na literatura em relação aos teores adequados de B na parte aérea das plantas e essas talvez possam ser explicadas pelas diferenças de cultivares empregados e pelas condições climáticas, tais como a temperatura, a umidade relativa do ar e a intensidade de luz, fatores que podem aumentar ou diminuir o teor de B nessa parte das plantas (Mengel & Kirkby, 1987). As diferenças quanto à exigência desse nutriente podem ser atribuídas às diferenças na composição química das paredes celulares entre e dentro das diversas espécies (Marschner, 1995).

Kabata-Pendias & Pendias (1985) sugeriram, como níveis excessivos ou tóxicos para as plantas, teores entre 50 e 200 mg kg⁻¹. Para o trigo, Gupta (1979) considerou os níveis acima de 34 mg kg⁻¹ como tóxicos, avaliados na palha da cultura.

Castro (1999), estudando os efeitos da adição de boro e de estresse hídrico na nutrição e produção do girassol em casa de vegetação, verificou que teores adequados de B nas folhas da cultura se situam entre 42 e 43 mg kg⁻¹, obtidos com a aplicação de 0,46 e 0,51 mg kg⁻¹ de B, respectivamente.

A tolerância de cultivares de trigo à toxidez provocada por boro em solução nutritiva foi estudada por Furlani et al. (2003), que verificaram que o teor crítico nas folhas se situa entre 44 e 45 mg kg⁻¹ de B.

A importância do boro pode estar associada tanto com o aumento na produção como à diminuição desta, proporcionada por níveis elevados desse elemento nas plantas. Silva (1995) cita importante trabalho de Sedberry Jr. et al. (1969), em que esses autores observaram decréscimo de produção de algodão com o uso de B quando os resultados da análise química da primeira folha madura ultrapassavam a faixa de 40 a 50 mg kg⁻¹ de B.

É importante observar que, embora não tenha sido significativa a interação entre as doses de B e as doses de Si para o teor de B nos grãos e na parte aérea, verificou-se, nesse experimento uma tendência generalizada de redução no teor de B nos grãos e na parte aérea conforme foram aumentadas as doses de Si aplicadas (Tabela 5).

4.1.5 Teor de silício em grãos e na parte aérea

Analisando a tabela 6, observa-se que o teor de Si nos grãos (TSiGr) aumentou conforme foram sendo incrementadas as doses de Si no solo, acompanhando a produção de matéria seca de grãos (MSGr). Houve aumento na produção de MSGr e também no TSiGr à medida que as doses de Si aplicadas no solo foram aumentadas.

De acordo com Malavolta (1980), o teor de silício nos grãos de arroz está situado entre quantidades traço e 0,08%.

Em relação ao teor de silício na parte aérea (TSiPA), nota-se a mesma tendência do TSiGr, ou seja, conforme foram aumentadas as doses de Si no solo, foram incrementados os TSiPA (Tabela 6), apesar desses tratamentos não terem influenciado significativamente a produção de matéria seca de parte aérea.

TABELA 6: Teor de silício em grãos e na parte aérea de plantas de arroz cultivadas no Neossolo Quartzarênico.

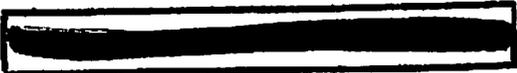
Si NO GRÃO					
Doses de Si (g dm ⁻³)	Doses de B mg dm ⁻³				
	0	0,5	1,5	4,5	13,5
	-----mg kg ⁻¹ -----				
0	2,3	1,8	1,4	1,9	1,8
0,15	2,5	3,8	2,3	2,5	2,1
0,30	2,3	3,4	3,6	3,6	3,0
0,60	3,9	7,2	5,9	4,7	6,3
DMS Silício	0,9				
Si NA PARTE AÉREA					
Doses de Si (g dm ⁻³)	Doses de B mg dm ⁻³				
	0	0,5	1,5	4,5	13,5
	-----mg kg ⁻¹ -----				
0	2,1	2,7	0,9	1,1	1,8
0,15	3,4	4,7	1,4	1,4	4,1
0,30	5,1	4,9	2,7	1,9	7,5
0,60	8,0	6,1	4,3	1,4	2,7
DMS Silício	1,8				

Mengel & Kirkby (1987) alertam que o teor de Si nas plantas depende muito do tipo de solo cultivado, e que gramíneas apresentam teor do elemento nas folhas em torno de 2%.

Para Malavolta (1980), o teor de silício verificado na parte aérea (folha + colmo) de plantas de arroz irrigado se situa entre 2,79 e 6,22%.

Jones et al. (1963) verificaram de 9,0 a 13,5% de SiO₂ (sílica) em folhas de plantas de aveia. Wooley (1957) avaliou o crescimento de plantas de tomate em soluções nutritivas isentas e com a presença de silício, e concluiu que níveis iguais ou inferiores a 0,2 μmol g⁻¹ de matéria seca, ou 0,0006 % nos tecidos era suficiente para o desenvolvimento normal das plantas.

Epstein (1999) disponibilizou estudo de dados sobre níveis de elementos minerais encontrados nas plantas, generalizadamente, encontrando teores de Si



na faixa de 0,1 a 10% na matéria seca, e cita que valores inferiores ou superiores a esses podem ser encontrados na literatura. Em relação aos níveis de outros elementos, como Ca (0,1 a 0,6 %), S (0,1 a 1,5 %) e outros, o autor mostrou que o Si está presente em quantidades equivalentes às encontradas para os macronutrientes, ou até mesmo às excede em níveis maiores.

Pesquisadores japoneses analisaram o teor de silício em materiais vegetais de numerosas espécies e, nessas avaliações, observaram que o menor teor de Si foi obtido em *Sanseveria trifasciata* (Agavaceae), de 0,1 % na matéria seca, e o maior teor encontrado foi de 6,3 %, na matéria seca de folhas de arroz. Verificaram também que o coeficiente de variação foi maior para o silício em relação aos outros elementos. Em angiospermas, houve correlação negativa entre valores de Si e B e positiva, entre Ca e B.

O teor de Si nas plantas varia grandemente entre genótipos. Essas diferenças, excepcionalmente grandes, podem ocorrer inclusive entre genótipos da mesma espécie de plantas, conforme demonstrado para ecótipos de arroz por Deren et al. (1992) e Winslow (1997).

Jones & Handreck (1967) propuseram a divisão entre as plantas em relação aos teores de silício e citam que as gramíneas apresentam os maiores valores, da ordem de 10 a 15 % com base na matéria seca.

4.2 Latossolo Vermelho distroférico

O resumo da análise de variância (quadrado médio e significância) dos componentes de produção vegetal: matéria seca de grãos (MSGr), matéria seca de parte aérea (MSPA), matéria seca de raízes (MSR), número de perfilhos (PERF) e altura de plantas (ALT), e dos componentes de produção de grãos: número de panículas.vaso⁻¹ (PAN), número de grãos.panícula⁻¹.vaso⁻¹ (GrPAN), porcentagem de grãos cheios.vaso⁻¹ (PGrCh) e peso de cem grãos.vaso⁻¹ (PCGr), referentes a esse experimento, é apresentado a seguir.

Tabela 7: Resumo da análise de variância (QM e significância) do experimento no Latossolo Vermelho distroférico.

Variáveis	CV (%)	Quadrado médio das fontes de variação		
		Doses de B	Doses de Si	B * Si
MSGr	12,56	86,9872 ^{NS}	37,7763 ^{NS}	51,2755 ^{NS}
MSPA	5,55	41,0761 ^{NS}	7,2797 ^{NS}	34,0287 ^{NS}
MSR	17,59	37,3763 ^{NS}	58,6630 ^{NS}	126,3066 ^{NS}
PERF	7,48	75,3500 ^{**}	11,3944 ^{NS}	10,0611 ^{NS}
ALT	5,32	23,5417 ^{NS}	9,2202 ^{NS}	17,2591 ^{NS}
PAN	10,19	52,2750 ^{**}	6,8000 ^{NS}	28,9528 ^{NS}
GrPAN	12,00	27,2250 ^{NS}	233,6611 ^{NS}	71,8694 ^{NS}
PGrC	13,74	32,3053 ^{NS}	257,1455 [*]	46,6969 ^{NS}
PCGr	3,43	0,0366 ^{NS}	0,0105 [*]	0,0140 ^{NS}

*, **, NS – significativo a 5%, a 1% e não significativo, respectivamente.

MSGr (Matéria Seca de Grãos), MSPA (Matéria Seca de Parte Aérea), MSR (Matéria Seca de Raízes), PERF (Número de Perfilhos), ALT (Altura de Plantas), PAN (Número de Panículas vaso⁻¹), GrPAN (Número de Grãos Panícula⁻¹ vaso⁻¹), PGrC (Porcentagem de Grãos Cheios vaso⁻¹) e PCGr (Peso de Cem Grãos vaso⁻¹).

4.2.1 Número de perfilhos (PERF) e número de panículas (PAN)

A análise de variância referente ao número de perfilhos (PERF) e ao número de panículas (PAN) mostrou que as doses de B influenciaram significativamente ($P < 0,01$) tais variáveis. Ajustando equações de regressão para valores estimados de tais variáveis, verifica-se que o modelo que melhor se ajustou às respostas foi o linear decrescente (Figura 5).

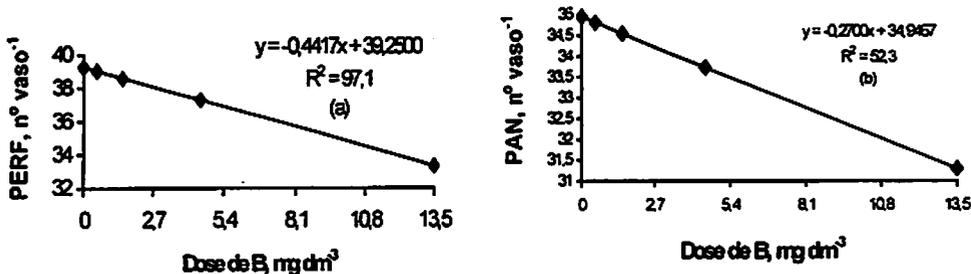


FIGURA 5: Número de perfilhos (PERF) (a) e de panículas (PAN) (b) em função das doses de B aplicadas no Latossolo Vermelho distroférico.

Observa-se que houve queda no número de perfilhos e no número de panículas a partir da aplicação de B, indicando que o teor de B disponível às plantas anteriormente à adubação (0,4 mg dm⁻³ de B) foi suficiente para a produção do maior número de perfilhos e também do maior número de panículas por vaso, mesmo estando na faixa considerada de média disponibilidade de B por CFSEMG (1999), de 0,36 a 0,60 mg de B.dm⁻³. Provavelmente, após aplicação das doses, ocorreu efeito depressivo devido à toxidez pelo micronutriente. Estas respostas não eram esperadas, uma vez que solos com textura argilosa apresentam maior capacidade de adsorção de B do que os de textura arenosa (Sims & Bingham, 1968), embora isto não signifique maior disponibilidade para as plantas.

Stone (1990), realizando uma revisão sobre deficiência e toxidez de B em espécies florestais, verificou que toxidez de B em plantios florestais é incomum, porém pode-se originar a partir de uma série de fatores, incluindo distribuição irregular de fertilizantes contendo boro para prevenção de deficiências, ou outras causas locais que também podem ocorrer, como a aplicação ou deposição atmosférica de escórias contendo B.

Em um estudo sobre a resposta de plantas de ervilha (*Pisum sativum* L.) à altas concentrações de B no solo, Bagheri et al. (1992) verificaram que a

expressão dos sintomas era altamente correlacionada com a produção de matéria seca e com a concentração de B nos tecidos sob condições de alta concentração de B. Um baixo grau de expressão dos sintomas por genótipos tolerantes poderia ser atribuído a baixos níveis de B nos tecidos vegetativos. Os resultados deste estudo indicaram que existe uma considerável variação genética dentro da espécie *Pisum sativum* L. e que a tolerância ao excesso de B poderia ser transferida para variedades sensíveis.

Poole et al. (1991) estudaram os sintomas de toxidez induzida de B em folhagens, por meio de estudo visando determinar os níveis de tolerância e sintomas de toxidez por B de doze folhagens populares. Os resultados mostraram uma ampla variação de níveis de tolerância, já que algumas espécies exibiram danos foliares após uma aplicação, outras tornaram-se cloróticas após cinco aplicações. Danos foliares e concentrações foliares de B induzidas pela toxidez por tal micronutriente foram descritos para cada espécie. Os sintomas de toxidez de B se desenvolveram em folhas velhas, geralmente iniciando pela clorose nas margens ou manchas cloróticas na base das folhas, eventualmente tornando-se necróticas e, em alguns casos, ocorrendo queda das folhas. Em algumas espécies, os sintomas consistiam de lesões escuras rodeadas por manchas cloróticas sobre as folhas.

4.2.2 Porcentagem de grãos cheios e peso de cem grãos

Tratando-se das variáveis porcentagem de grãos cheios (PGrCh) e peso de cem grãos (PCGr), observa-se através da análise de variância, ter havido significância ($P < 0,05$) para as doses de Si. As médias dessas variáveis aumentam, respondendo a incrementos lineares das doses deste elemento.

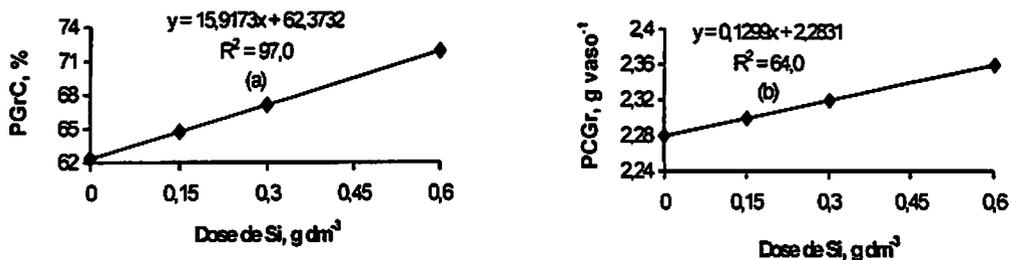


FIGURA 6: Porcentagem de grãos cheios (a) e peso de cem grãos (b) de arroz em função das doses de Si aplicadas no Latossolo Vermelho distroférico.

Pode-se inferir que o Si foi capaz de contribuir para o incremento em tais variáveis. Marschner (1995) comenta que em cultivos de arroz em solos inundados deficientes em tal elemento, o crescimento vegetativo e a produção de grãos foram nitidamente reduzidos e sintomas de deficiência, como necrose de folhas velhas e murcha das folhas, também podem ocorrer, sugerindo, mas não provando, que o silício é essencial ao crescimento do arroz.

Chen & Lewin (1968) analisaram o silício como um nutriente para a espécie *Arquisetum arvense*, utilizando plantas jovens da espécie, retiradas da região. As plantas foram lavadas com água destilada e cultivadas em potes plásticos com solução nutritiva definida, variando as concentrações de Si. Houve incrementos no crescimento, medido pela produção de matéria seca, com o aumento das doses de Si na solução nutritiva. Plantas com o suprimento adequado de Si (40-80 mg L⁻¹ de Si, repostas a cada 2 semanas) apresentaram-se normais e mais saudáveis em relação àquelas que não receberam os tratamentos, as quais apresentaram sintomas de deficiência. Foi concluído ser o silício um elemento útil ao crescimento saudável da espécie *Arquisetum arvense*.

No Japão, 25 % da área cultivada com arroz recebe, anualmente, aplicações de silicatos de Ca, que podem variar de 0,5 a 1,0 t, embora a

quantidade recomendada seja de 1,5 a 2,0 t ha⁻¹. Além do efeito do Si como elemento útil para o arroz, capaz de aumentar o rendimento da cultura, vários pesquisadores demonstraram que ele está relacionado à resistência do arroz a várias e importantes doenças (Datnof et al., 1990).

Korndörfer et al. (1995) publicaram um trabalho sobre a influência do silício na descoloração de grãos e no desenvolvimento de plantas de arroz de terras altas em cinco regiões do cerrado brasileiro. Verificaram que em solos deficientes em Si, adubações com silicato de cálcio podem reduzir doenças em arroz e aumentar suas produções. Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação e cinco doses de Si foram aplicadas em cada solo (0, 120, 240, 480 e 960 kg.ha⁻¹). Os autores concluíram que aplicações de Si aumentaram o peso total dos grãos e reduziram a descoloração dos grãos, independentemente do tipo de solo. Em adição, a concentração de Si aumentou nas folhas.

Certas plantas, como o arroz e a cana-de-açúcar, acumulam grandes quantidades de silício e geralmente produzem mais quando cultivadas em solos que apresentam altos teores de silício solúvel. A sílica (Si) aplicada como adubo ao solo vem sendo apontada como uma alternativa no manejo de doenças patogênicas e ataque de pragas com reflexos sobre a produtividade do arroz e da cana-de-açúcar em particular. Acredita-se que o silício proporcione maior resistência às paredes das células, tornando-as menos vulneráveis às enzimas de degradação. Várias doenças foram avaliadas quantitativamente por um período de 3 anos, concluindo-se que o Si pode exercer um controle efetivo de algumas doenças com redução do impacto ambiental e aumento da produtividade (Korndörfer & Datnof, 1995).

4.2.3 Teor de boro em grãos e na parte aérea

Pode ser observado, na tabela 8, que o teor de boro nos grãos (TBGr) sofreu influência da interação entre as doses de boro e as doses de silício, apesar da produção de matéria seca de grãos não ter sido influenciada por nenhum dos tratamentos.

Vale ressaltar que houve uma tendência de redução no teor de B nos grãos conforme foram incrementadas as doses de Si, mesmo nas doses mais elevadas de B, sugerindo uma interação entre estes elementos.

TABELA 8: Teor de boro em grãos e na parte aérea de plantas de arroz cultivadas no Latossolo Vermelho distroférrico.

B NO GRÃO					
Doses de Si (g dm ⁻³)	Doses de B mg dm ⁻³				
	0	0,5	1,5	4,5	13,5
	mg kg ⁻¹				
0	10,4	10,4	17,8	11,3	24,8
0,15	15,9	6,6	8,7	11,2	15,4
0,30	6,6	7,2	13,6	10,2	15,1
0,60	7,7	5,4	6,8	5,8	9,0
DMS B*Si			7,9		
B NA PARTE AÉREA					
Doses de Si (g dm ⁻³)	Doses de B mg dm ⁻³				
	0	0,5	1,5	4,5	13,5

	mg kg ⁻¹				
0	36,1	25,4	28,7	22,8	34,5
0,15	23,94	27,2	22,3	24,7	34,4
0,30	25,1	25,6	21,9	26,7	33,9
0,60	26,9	23,7	25,4	26,8	28,1
DMS B			5,7		

Tratando-se do teor de B na parte aérea (TBPA), verifica-se que esta variável sofreu influência das doses de boro aplicadas no solo, apesar da

produção de matéria seca de parte aérea não ter sido influenciada por esse nutriente. Mengel & Kirkby (1987) citam que diferenças entre teores foliares podem ser obtidas mesmo havendo produção de matéria seca estatisticamente igual.

Em condições de campo, Gupta et al. (1979) verificaram que em trigo e cevada, mesmo concentrações de B na parte aérea menores que 11 e 14 mg kg⁻¹, respectivamente, podem causar sintomas de toxidez de B logo após emergência das folhas.

Bergmann (1992) cita a faixa de B que varia de 50 a 70 mg kg⁻¹ como tóxica para a cultura da cevada.

A resposta à aplicação de boro sofre grande influência do tipo de solo, conforme comenta Costa (2001), uma vez que solos mais argilosos adsorvem mais e disponibilizam menos o nutriente do que solos arenosos, pois a predominância de hidróxidos de alumínio naqueles solos faz com que apresentem maior capacidade de fixação do elemento, formando compostos insolúveis.

Percebe-se mais uma vez, nesse experimento, que apesar de não ter sido significativa a interação entre as doses de B e as de Si para o teor de B na parte aérea, essa variável apresentou tendência de redução com a aplicação de doses mais elevadas de Si. Esse fato não foi observado apenas quando foi adicionada a dose de 4,5 mg dm⁻³ de B (Tabela 8).

4.2.4 Teor de silício em grãos e na parte aérea

Houve interação significativa entre as doses de boro e de silício para o teores de silício nos grãos (TSiGr) e na parte aérea (TSiPA). Entretanto, houve uma enorme dificuldade para a interpretação dos dados devido à falta de tendência dos mesmos (Tabela 9).

Deren et al. (1992) analisaram o teor de silício em materiais vegetais de numerosas espécies e nessas tabulações encontraram que para angiospermas houve uma correlação negativa entre valores de Si e B encontrados na parte aérea.

TABELA 9: Teor de silício em grãos e na parte aérea de plantas de arroz cultivadas no Latossolo Vermelho distroférico.

Si NO GRÃO					
Doses de Si (g dm ⁻³)	Doses de B mg dm ⁻³				
	0	0,5	1,5	4,5	13,5
	mg kg ⁻¹				
0	2,5	1,2	1,8	1,8	1,8
0,15	2,3	3,8	1,2	1,9	2,1
0,30	2,5	2,3	2,9	3,0	2,8
0,60	2,3	3,8	3,9	4,2	4,7
DMS B*Si			2,1		
Si NA PARTE AÉREA					
Doses de Si (g dm ⁻³)	Doses de B mg dm ⁻³				
	0	0,5	1,5	4,5	13,5

	mg kg ⁻¹				
0	5,3	4,7	5,1	6,4	6,6
0,15	6,3	8,7	7,0	9,5	9,3
0,30	9,1	10,5	8,2	11,8	13,4
0,60	2,5	3,8	3,2	3,4	13,1
DMS B*Si			2,6		

Em estudos realizados por Nable et al. (1990) sobre a absorção de boro e silício por plantas de cevada com diferentes suscetibilidades à toxidez provocada por B, observou-se que plantas com maior suscetibilidade a esse estresse acumularam Si em maiores taxas que genótipos menos suscetíveis. Esses mesmos autores notaram, ainda, não ter havido indicação competitiva entre B e Si em relação à absorção, mesmo quando a concentração externa de cada um era muito alta.

5 CONCLUSÕES

Houve efeito da aplicação de boro e de silício na nutrição e na produção das plantas de arroz cultivadas tanto no Neossolo Quartzarênico quanto no Latossolo Vermelho distroférico.

No Neossolo Quartzarênico, o boro influenciou as componentes de produção vegetal e de grãos, e a matéria seca de grãos foi incrementada com a adubação silicatada.

No Latossolo Vermelho distroférico, o número de panículas e de perfilhos sofreram influência do boro, e o silício potencializou o enchimento e, conseqüentemente, o peso dos grãos de arroz.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADATIA, M. H.; BESFORD, R. T. The effect of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. **Annals of Botany**, London, v. 58, n. 3, p. 343-351, Sept. 1986.
- AGRIANUAL - Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, 2003, p.
- AHMAD, R.; ZAHEER, S. H.; ISMAIL, S. Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant Science**, Clare, v. 85, n. 1, p. 43-50, 1992.
- ALLEONI, L. R. F. **Adsorção de boro em podzólico e latossolos paulistas**. 1996. 127 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.
- ALVAREZ, J.; DATNOFF, L. E. The economic potential of silicon for integrated management and sustainable rice production. **Crop Protection**, Oxford, v. 20, n. 1, p. 43-48, Feb. 2001.
- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; BRAGA, J. M.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F.; RIBEIRO, A. C.; DEFELIPO, D. V. Avaliação da fertilidade do solo: metodologia. In: SIMPÓSIO DA PESQUISA DA UFV, 1., 1988, Viçosa. **Resumos....** Viçosa: UFV, 1988. p. 68-69.
- ASSIS, M. P. **Limitações nutricionais para a cultura do arroz (*Oryza sativa* L.) em solos sob inundação**. 1997. 49 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- BAGHERI, A.; PAULL, J. G.; RATHJEN, A. J.; ALI, S. M.; MOODY, D. B. Genetic variation in the response of Pea (*Pisum sativum* L.) to high soil concentrations of boron. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 146, n. 1/2, p. 261-269, Oct. 1992.
- BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; PREBHU, A. S.; DATNOFF, L. E.; KORNDÖRFER, G. H. Importância do silício para a cultura do arroz: uma revisão de literatura. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 8, p. 1-9, mar 2000. Encarte técnico.

BASSAGLI, M. A. B. Efeito da aplicação de silicato de sódio na resistência de plantas de trigo ao pulgão-verde *Schizaphis graminum* (Rondani, 1852) (Hemiptera: Aphididae) e deste pulgão em alguns aspectos biológicos do predador *Crysoperla externa* (Hagen, 1861) (Neuroptera: Crysopidae). 2002. 49 p. Dissertação (Mestrado em Entomologia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

BÉLANGER, R. R.; BOWEN, P. A.; EHRET, D. L.; MENZIES, J. G. Soluble silicon. Its role in crop and disease management of greenhouse crops. *Plant Disease*, Saint Paul, v. 79, n. 4, p. 329-336, Apr. 1995.

BERGER, K. C.; TRUOG, E. Boron determination in soils and plants. *Industrial and Engineering Chemistry*, Washington, v. 11, p. 540-545, 1939.

BERGMANN, W. *Nutritional disorders of plants: development, visual and analytical diagnosis*. New York: G. Fisher, 1992. 741 p.

BOUCHADERT, J. A. Crescimento, características físicas e anatômicas da madeira juvenil de dois clones de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação de B. 2002. 69 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

BROWN, P. H.; HU-HENING; ROBERTS, W. G.; HU, H. N. Occurrence of sugar alcohols determines boron toxicity symptoms of ornamentals species. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Alexandria, v. 124, n. 4, p. 347-352, July 1999.

CARVALHO, R. Interações silício-fósforo em latossolo vermelho-escuro e cambissolo cultivados com mudas de eucalipto. 1999. 89 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; FERNANDES, L. A.; OLIVEIRA JUNIOR, A. C. Dessorção de fósforo por silício em solos cultivados com eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 24, n. 1, p. 69-74, jan./mar. 2000.

CARVALHO, S. P.; MORAES, J. C.; CARVALHO, J. G. Efeito do silício na resistência do sorgo (*Sorghum bicolor*) ao pulgão verde *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil*, Londrina, v. 28, n. 4, p. 505-510, dez. 1999.

CHEN, C. H.; LEWIN, J. Silicon as a nutrient element for *Equisetum arvense*. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 47, n. 1, p. 125-131, Jan. 1968.

CHÉRIF, M.; BENHAMU, N.; MENZIES, J. G.; BÉLANGER, R. R. Silicon induced resistance in cucumber plants against *Phytophthora ultimum*. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, London, v. 41, n. 5, p. 371-383, 1992.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS – CFSEMG. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes de Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa, 1999. 359 p.

COSTA, A. Adsorção de boro em oito solos do Paraná e resposta do algodoeiro à adubação boratada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 3., 2001, Campo Grande. **Resumos...** Campo Grande, 2001. v. 2, p. 1005-1007.

COTTON, A. F.; WILKINSON, G. **Advanced inorganic chemistry**. New York: John Wiley, 1972. 1327 p.

DAVIS, J. M.; SANDERS, D. C.; NELSON, P. V.; LENGNICK, L.; SPERRY, W. J. Boron improves growth, yield, quality, and nutrient content of tomato. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 128, n. 3, p. 441-446, May 2003.

DATNOF, L. E.; RAID, R. N.; SNYDER, G. H.; JONES, D. B. Effect of calcium silicate on blast and brown spot intensities and yields of rice. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 75, n. 7, p. 729-732, July 1991.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis, physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. cap. 13, p. 545-566.

DEREN, C. W.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Variable silicon content of rice cultivars grown on Everglades Histosols. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 15, n. 11, p. 2363-2368, 1992.

EGUCHI, S. Effect of boron deficiency on growth, yield and contents of protein and fat in seeds of soyabeans (*Glycine max*). **Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 71, n. 2, p. 171-178, 2000.

ELAWAD, S. H.; GREEN JR., V. E. Silicon and the rice plant environment: a review of recent research. **II Riso**, Dordrecht, v. 28, p. 235-253, 1979.

ELRASHIDI, M. A.; O'CONNOR, G. A. Boron sorption and desorption in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 1, p. 27-31, Jan./Feb. 1982.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos e análises de solos**. Rio de Janeiro, 1979. n. p.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 91, n. 1, p. 11-17, Jan. 1994.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 641-664, 1999.

EXLEY, C. Silicon in life: a bioinorganic solution to bioorganic essentiality. **Journal of Inorganic Biochemistry**, New York, v. 69, n. 3, p. 139-144, Feb. 1998.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 178 p.

FORNASIERI FILHO, D.; FORNASIERI, J. L. **Manual da cultura do arroz**. Jaboticabal: UNESP, 1993. 221 p.

FREIRE, J. C.; RIBEIRO, M. A. V.; BAHIA, V. G.; LOPES, A. S.; AQUINO, L. H. Resposta do milho cultivado em casa de vegetação a níveis de água em solos da região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, n. 1, p. 5-8, jan./abr. 1980.

FURLANI, A. M. C.; CARVALHO, C. P.; FREITAS, J. G.; VERDIAL, M. F.; FREITAS, J. G. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 2, p. 359-370, abr./jun. 2003.

FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R.; RESENDE, A. V.; GUILHERME, L. R. G.; GUEDES, G. A. A. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 252 p.

GALLO, J. R.; FURLANI, P. R. Determinação de silício em material vegetal pelo método colorimétrico do azul de molibdênio. **Bragantia**, Campinas, v. 37, n. 2, p. 5-11, jan. 1978.

GOMES, F. B. **Indução de resistência em trigo por silício e pelo pulgão *Schizaphis graminum***. 2003. 51 p. Dissertação (Mestrado em Entomologia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

GOUSSAIN, M. M. Efeito da aplicação do silício em plantas de milho no desenvolvimento biológico da lagarta-do-cartucho *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) e do pulgão-da-folha *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856) (Hemiptera: Aphididae). 2001. 63 p. Dissertação (Mestrado em Entomologia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

GOUSSAIN, M. M.; MORAES, J. C.; CARVALHO, J. G.; NOGUEIRA, N. L.; ROSSI, M. L. Efeito da aplicação de silício em plantas de milho no desenvolvimento biológico da lagarta-do-cartucho *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 305-310, Apr./June 2002.

GUNES, A.; ALPASLAN, M.; CIKILY, Y.; OZCAN, H. Effect of zinc on the alleviation of boron toxicity in tomato. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 22, n. 7, p. 1061-1068, 1999.

HORIGUCHI, T. Mechanism of manganese toxicity and tolerance of plants. IV - Effects of silicon on alleviation of manganese toxicity of rice plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 34, n. 1, p. 65-73, 1988.

JOLY, W. L. **A química dos não-metals**. São Paulo: Edgard Blücher, 1966. 176 p.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants and animals. **Advances in Agronomy**, London, v. 19, p. 107-149, 1967.

JONES, L. H. P.; MILNE, A. A.; WADHAM, S. M. Studies of silica in the oat plant – II. Distribution of the silica in the plant. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 18, n. 3, p. 358-371, 1963.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. Elements of group III. In: **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 1985. cap. 8, p. 127-149.

KALAYCI, M.; ALKAN, A.; CAKMAK, I. Studies on differential response of wheat cultivars to boron toxicity. **Developments in Plant Breeding**, v. 6, p. 189-195, 1997.

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 American Journal*, Madison, v. 49, n. 6, p. 1466-1470, Nov./Dec. 1985.

KORNDÖRFER, G. A.; DATNOFF, L. E. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana-de-açúcar e do arroz. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, v. 70, p. 1-5, jun. 1995.

LARCHER, W. *Okophysiologie der Pflanzen*. Germany: Eugen Ulmer GmbH & Co., 2000. 531 p.

LI, Y. C.; AD VA, A. K.; SUMNER, M. E. Response of cotton cultivars to aluminum in solutions with varying silicon concentrations. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v. 12, p. 881-892, 1985.

LIAN, S. Silica fertilization of rice. In: *The Fertility of Paddy Soils and Fertilizer Applications for Rice*. Food Fert. Tech. Cent. Asia Pac. Reg., Taipei, Taiwan, 1976. p. 197-221.

LINDSAY, W. L. Inorganic phase equilibria of micronutrients in soils. In: MORTVEDT, J. J.; GIORDANO, P. M.; LINDSAY, W. L. *Micronutrients in agriculture*. Madison: Soil Science Society of America, 1972. p. 41-57.

LOOMIS, W. D.; DURST, R. W. Chemistry and biology of boron. *Biofactors*, Oxford, v. 3, n. 4, p. 229-239, Apr. 1992.

MALAVOLTA, E. *Elementos de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 215 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. Piracicaba: Associação Brasileira de Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 210 p.

MARCONI, A.; FREIRE, O.; ABRAHÃO, I. O.; BRASIL SOBRINHO, M. O. C. Boro nos minerais, rochas, solos e plantas. *Revista da Agricultura*, Piracicaba, v. 55, n. 1/2, p. 33-39, maio 1980.

MARIANO, E. D. *Resposta, níveis críticos e eficiência de extratores para boro em feijoeiro cultivado em solos de várzea*. 1998. 82 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.

McKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soil solutions. I. The form and concentration of dissolved silica in aqueous extracts of some soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 43, n. 1, p. 70-82, Mar. 1963.

McNAUGHTON, S. J.; TARRANTS, J. L.; McNAUGHTON, M. M.; DAVIS, R. H. Silica as a defense against herbivory and a growth promotor in african grasses. **Ecology**, Washington, v. 66, n. 2, p. 528-535, 1985.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. Bern: International Potash Institute, 1987. 593 p.

MYIAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth of cucumber plant in soil culture. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 29, n. 4, p. 463-471, 1983.

NABLE, R. O.; BAÑUELOS, G. S.; PAULL, J. G. Boron toxicity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 193, n. 1/2, p. 181-198, June 1997.

NABLE, R. O.; LANCE, R. C. M.; CARTWRIGHT, B. Uptake of boron and silicon by barley genotypes with differing suscetibilities to boron toxicity. **Annals of Botany**, London, v. 66, n. 1, p. 83-89, July 1990.

NEUMANN, D.; FIGUEIREDO, C. A novel mechanism of silicon uptake. **Protoplasma**, New York, v. 220, n. 1/2, p. 59-67, 2002.

PARKS, W. L.; WHITE, J. L. Boron retention by clay and humus systems saturated with various cations. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 16, n. 3, p. 298-230, 1952.

PAULL, J. G.; NABLE, R. O.; LAKE, A. W. H.; RATHJEN, A. J.; MATERNE, M. A. Response of annual medics (*Medicago* spp.) and field peas (*Pisum sativum*) to high concentrations of boron: genetic variation and the mechanism of tolerance. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 43, n. 1, p. 203-213, 1992.

PEREIRA, J. A. **Cultura do arroz no Brasi: subsidios para a sua história**. Teresina: EMBRAPA Meio-Norte, 2002. 226 p.

PONNAMPERUMA, F. N. **The mineral nutrition of the rice plant**. Baltimore: John Hopkins, 1964. p. 461-82.

- POOLE, R. T.; CONOVER, C. A.; STEINKAMP, K. Sym.ptoms of boron toxicity induced in foliage plant. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, Orlando, v. 104, p. 301-303, 1991.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.
- RANKAMA, K.; SAHAMA, T. G. **Geoquímica**. Madrid: Aguilar, 1962. 862 p.
- RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews**, Cambridge, v. 58, n. 2, p. 179-207, 1980.
- SUSSMAN, M. RICHMOND, K. E. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 6, n. 3, p. 268-272, June 2003.
- SAVANT, N. K.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Depletion of plant-available silicon in soils: a possible cause of declining rice yields. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 28, n. 13/14, p. 1245-1252, 1997a.
- SAVANT, N. K.; KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Silicon nutrition and sugarcane production: A Review. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 22, n. 12, p. 1853-1903, 1999.
- SAVANT, N. K.; SNYDER, G. D.; DATNOFF, L. E. Silicon in management and sustainable rice production. **Advances in Agronomy**, London, v. 58, p. 151-199, 1997b.
- SILVA, N. M. Dez anos de sucessivas adubações com boro no algodoeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 54, n. 1, p. 177-185, 1995.
- SIMS, J. R.; BINGHAM, F. T. Retention of boron by layer silicates, sesquioxides and soil materials: II. Sesquioxides. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 32, n. 3, p. 364-369, May/June 1968.
- SOTIROUPOLOS, T. E.; THERIOS, I. N.; DIMASSI, K. N. Calcium application as a means to improve tolerance of kiwifruit (*Actinidia deliciosa* L.) to boron toxicity. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 81, n. 4, p. 443-449, Oct. 1999.

STONE, E. L. Boron deficiency and excess in forest trees: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 37, n. 1/3, p. 49-75, Nov. 1990.

VETTORI, L. **Métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1969. 24 p. (Boletim Técnico, 5).

WILLIAMS, D. E.; VLAMIS, J. Manganese and silicon interaction in the Gramineae. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 27, p. 131-140, 1957.

WIMMER, M. A.; MUEHLING, K. H.; LAUCHLI, A.; BROWN, P. H.; GLODBACH, H. E. Interaction of salinity and boron toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Fourteenth International Plant Nutrition Colloquium**, p. 426-427, 2001.

WINSLOW, M. D.; OKADA, K.; CORREA-VICTORIA, F. Silicon deficiency and the adaptation of tropical rice ecotypes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 188, n. 2, p. 239-248, Jan. 1997.

WOOLEY, J. T. Sodium and silicon as nutrients for the tomato plant. **Plant Physiology**, Rockville, v. 32, n. 4, p. 317-321, Oct. 1957.

YOSHIDA, S.; OHNISHI, Y.; KITAGISHI, K. Role of silicon in rice nutrition. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 5, p. 123-133, 1959.