

PRISCILA MARIA DE AQUINO

**AVALIAÇÃO DE FONTES DE BORO E ZINCO NA SUCESSÃO
MILHO-SOJA-MILHETO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A657a
2018 Aquino, Priscila Maria de, 1991-
Avaliação de fontes de boro e zinco na sucessão
milho-soja-milheto / Priscila Maria de Aquino. – Viçosa, MG,
2018.
ix, 36 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Edson Marcio Mattiello.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Adubos e fertilizantes - Solubilidade. 2. Boro. 3. Zinco.
4. Micronutrientes. 5. Cultivo intercalado. 6. Milho. 7. Soja.
8. Milheto. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de
Plantas. II. Título.

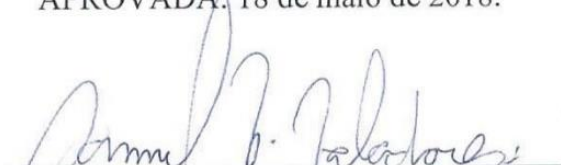
CDD 22. ed. 631.8


PRISCILA MARIA DE AQUINO


**AVALIAÇÃO DE FONTES DE BORO E ZINCO NA SUCESSÃO
MILHO-SOJA-MILHETO**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 18 de maio de 2018.


Samuel Vasconcelos Valadares


Felipe Lopes da Silva


Genelício Crusóe Rocha


Edson Marcio Mattiello
(Orientador)

À minha mãe, Maria Cleusa, pelo exemplo de garra, força e por ser meu maior apoio.

Às minhas irmãs Patrícia e Paloma, por estarem sempre comigo.

Ao meu pai, Amarildo.

Ao meu cunhado, Carlos Frederico, por todo o incentivo.

À toda família Aquino e Lima (Mumbeca).

Dedico

“Um sonho sonhado sozinho, é um sonho. Um sonho sonhado junto, é realidade”.

Yoko Ono

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ser mediador desta graça e me permitir sempre ir além. Por toda a força e coragem, que me deram condição de ir em diante a cada dificuldade.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do Departamento de Solos, por possibilitar a realização deste curso.

Ao CNPq e Produquímica, pelos auxílios financeiros.

Ao Professor Edson Márcio Mattiello, pela orientação, acolhida e amizade.

Ao Wedisson Santos pela amizade, disponibilidade, paciência e rica contribuição em todas as etapas deste trabalho.

Ao professor Leonardus Vergutz, pelo apoio e amizade.

Aos demais Professores do DPS, por contribuírem com minha formação, destacando Júlio Neves, João Ker e Reinaldo Cantarutti.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Pós-graduação, especialmente à Adriana, Fabiane Ballotin, Carol Brandão, Beto e Poliana.

À Isabela Saldanha, Lina Pantoja e Diana López, pelas contribuições na condução dos experimentos.

Aos membros do Gefert, pela amizade e momentos de aprendizagem.

Aos técnicos e amigos do Laboratório de Isótopos Estáveis.

Aos colegas da Pós- Graduação, especialmente Rodrigo Nogueira, Rafael Silva e Patrícia Matias, pela amizade e companheirismo desde o primeiro momento.

Ao meu cunhado, Carlos Frederico por todo apoio e incentivo durante a escrita deste trabalho.

Ao IPACER e à EMBRAPA Milho e Sorgo, pela concessão das sementes utilizadas.

Às minhas amigas Hérika Pessoa, Flávia Alves, Sheila Andrade, Thaísa Oliveira, e Anita Fernandes, pelo apoio em mais uma etapa.

BIOGRAFIA

PRISCILA MARIA DE AQUINO, filha de Amarildo José de Aquino e Maria Cleusa de Lima, nasceu em 25 de novembro de 1991, em Barbacena- MG. Em dezembro de 2010, concluiu o curso Técnico em Agropecuária pela Escola Agrotécnica Federal de Barbacena, atual Instituto Federal de Educação do Sudeste *campus* Barbacena- MG. Em agosto de 2011, iniciou a graduação em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal de Viçosa *campus* Rio Paranaíba (UFV- CRP), concluindo-o em julho de 2016. Em agosto de 2016, iniciou o mestrado em Solos e Nutrição de Plantas na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em maio de 2018.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS	2
CAPÍTULO 1	3
RESUMO	3
1.1 INTRODUÇÃO.....	4
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	5
1.3 RESULTADOS	7
1.4 DISCUSSÃO	16
1.5 CONCLUSÕES	18
1.6 REFERÊNCIAS	18
CAPÍTULO 2	20
RESUMO	20
2.1 INTRODUÇÃO.....	21
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
2.3 RESULTADOS	24
2.4 DISCUSSÃO	32
2.5 CONCLUSÃO.....	34
2.6 REFERÊNCIAS	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Produção de matéria seca, teor de B, conteúdo de B e taxa de recuperação de B no milho, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.....	10
Tabela 1.2: Produção de matéria seca, teor de B, conteúdo de B e taxa de recuperação de B na soja, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.....	11
Tabela 1.3: Produção de matéria seca, teor de B, conteúdo de B e taxa de recuperação de B no milho, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.....	12
Tabela 1.4: Produção de matéria seca, teor de B, conteúdo de B e taxa de recuperação de B totais, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.....	13
Tabela 2.1: Produção de matéria seca, teor de Zn, conteúdo de Zn e taxa de recuperação de Zn no milho, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.	26
Tabela 2.2: Produção de matéria seca, teor de Zn, conteúdo de Zn e taxa de recuperação de Zn na soja, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.....	27
Tabela 2.3: Produção de matéria seca, teor de Zn, conteúdo de Zn e taxa de recuperação de Zn no milho, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.	28
Tabela 2.4: Produção de matéria seca, conteúdo de Zn e taxa de recuperação totais, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.	29

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1** Conteúdo de B na parte aérea do milho, soja e milheto, em função de doses de B aplicado via solo, considerando as fontes ES-B (●); H_3BO_3 (○) e Bórax (▼), em solos de textura argilosa e arenosa. O ES-B trata-se de um fertilizante co-pastilhado que contém S^0 (770 g kg^{-1} de S) e ulexita (20 g kg^{-1} de B). 14
- Figura 1.2** Conteúdo total de B na parte aérea, em função de doses de B aplicado via solo, considerando as fontes ES-B (●); H_3BO_3 (○) e Bórax (▼), em solos de textura argilosa e arenosa. O ES-B trata-se de um fertilizante co-pastilhado que contém S^0 (770 g kg^{-1} de S) e ulexita (20 g kg^{-1} de B). 15
- Figura 1.3** Eficiência relativa de absorção de B no milho, soja, milheto e total, considerando as fontes H_3BO_3 , Bórax e ES-B em solos de textura argilosa e arenosa. O ES-B trata-se de um fertilizante co-pastilhado que contém S^0 (770 g kg^{-1} de S) e ulexita (20 g kg^{-1} de B). ... 16
- Figura 2.1** Conteúdo de Zn na parte aérea do milho, soja e milheto, em função de doses de Zn, considerando as fontes ES-Zn (●); $ZnSO_4$ (○) e ZnO (▼), em solos de textura argilosa ou arenosa. O ES-Zn trata-se de um fertilizante co-pastilhado que contém S^0 (785 g kg^{-1} de S) e ZnO (50 g kg^{-1} de Zn). 30
- Figura 2.2** Conteúdo total de Zn na parte aérea, em função de doses de Zn aplicado via solo, considerando as fontes ES-Zn (●); $ZnSO_4$ (○) e ZnO (▼), em solos de textura argilosa e arenosa. O ES-Zn trata-se de um fertilizante co-pastilhado que contém S^0 (785 g kg^{-1} de S) e ZnO (50 g kg^{-1} de Zn). 31
- Figura 2.3** Eficiência relativa de absorção de Zn nos cultivos de milho, soja, milheto e total, considerando as fontes ES-Zn, $ZnSO_4$ e ZnO, em solos de textura argilosa ou arenosa. O ES-Zn trata-se de um fertilizante co-pastilhado que contém S^0 (785 g kg^{-1} de S) e ZnO (50 g kg^{-1} de Zn). 32

RESUMO

AQUINO, Priscila Maria de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2018. **Avaliação de fontes de boro e zinco na sucessão milho-soja-milheto.** Orientador: Edson Márcio Mattiello. Coorientadores: Leonardus Vergütz e Wedisson Oliveira Santos.

A presente dissertação trata de estudos relacionados à solubilidade de fertilizantes que contenham B e Zn e suas respectivas performances agrônômicas em cultivos em sucessão de milho-soja-milheto. No capítulo 1, conduziu-se ensaio em casa de vegetação no esquema fatorial $2 \times (3 \times 3 + 1)$. Foram utilizadas amostras de solo arenoso e argiloso, três fontes de B (H_3BO_3 , Boráx e ES-B), três doses do nutriente (0,5, 1,0; e 2,0 $mg\ dm^{-3}$ de B) e um tratamento controle, sem aplicação de B. Após cada cultivo, foi determinada a matéria seca da parte aérea (MS), o teor foliar de B, o conteúdo foliar de B, a taxa de recuperação de B e a eficiência relativa de absorção de B. O conteúdo de B na planta aumentou linearmente com aplicação do nutriente, para todas as fontes utilizadas. As fontes de B foram igualmente eficiente no suprimento de B para as plantas, não havendo diferenças estatísticas entre elas. A produção de MS foi maior no solo argiloso. No capítulo 2, conduziu-se ensaio em casa de vegetação no esquema fatorial $2 \times (3 \times 3 + 1)$. Foram utilizadas amostras de solo arenoso e argiloso, três fontes de Zn ($ZnSO_4$, ZnO e ES-Zn), três doses do nutriente (1,5; 3 e 6 $mg\ dm^{-3}$ de Zn) e um tratamento controle, sem aplicação de Zn. Não houve efeito das fontes na produção de matéria seca. Houve efeito no teor e conteúdo quando o fertilizante utilizado foi o $ZnSO_4$. A taxa de recuperação de Zn pelos cultivos foi afetada pelos diferentes fertilizantes, de forma diferenciada nos cultivos. O $ZnSO_4$ foi mais eficiente que demais fontes no fornecimento de Zn para os cultivos de soja e milho. O ZnO e ES-Zn nos dois primeiros cultivos não incrementaram o conteúdo de Zn com o aumento de suas doses, indicando não ter havido solubilização expressiva destes compostos no solo durante estes cultivos. Por outro lado, no milho, houve resposta ao aumento da dose de Zn para todos os fertilizantes. Os valores de eficiência relativa de absorção (ERA), considerando a fonte solúvel $ZnSO_4$ como 100 %, mostram que ao longo do tempo, houve um aumento progressivo na ERA para o fertilizante ES-Zn, em ambos os solos. O uso de fontes de baixa solubilidade mostram-se potencial para o suprimento de Zn a médio e longo prazo, porém a fonte solúvel foi mais eficiente no período avaliado .

ABSTRACT

AQUINO, Priscila Maria de, M.Sc. Universidade Federal de Viçosa, May, 2018. **Evaluation of boron and zinc in succession maize-soybean-millet succession.** Advisor: Edson Márcio Mattiello. Co-advisers: Leonardus Vergütz and Wedisson Oliveira Santos.

The present thesis provides information regarding the solubility of different Zn and B fertilizers and their respective agronomic performance in maize-soybean-millet succession. Chapter 1 refers to an experiment carried out in a greenhouse environment arranged in a $2 \times (3 \times 3 + 1)$ factorial scheme that consisted of two soils with different textures (a sandy and clayey soil), three B sources (H_3BO_3 , Boráx and ES-B), three B doses (0,5, 1; e 2 mg dm^{-3} of B) and a control treatment where no B fertilizer was applied. Dry matter of the aerial plant part (DM), foliar content, foliar level, recovery rate and relative efficiency of absorption of B were determined for each crop in succession. Foliar B content increased linearly as higher doses of B fertilizer were applied regardless the source used. The B sources tested were equally efficient in supplying B to the plants since no statistic differences were found between them. DM content observed was higher in the clayey soil. Chapter 2 refers to an experiment carried out in a greenhouse environment arranged in a $2 \times (3 \times 3 + 1)$ factorial scheme that consisted of two soils with different textures (a sandy and clayey soil), three Zn sources ($ZnSO_4$, ZnO and ES-Zn), three Zn doses (1,5; 3 e 6 mg dm^{-3} of Zn) and a control treatment where no Zn fertilizer was applied. The different Zn sources used did not affect dry matter content. Effect on foliar level and foliar content of Zn was found when the fertilizer $ZnSO_4$ was applied. Recovery rate of Zn was affected by the different Zn sources used and showed different behavior for each crop in succession. $ZnSO_4$ was the most efficient source in providing Zn for maize and soybean. ZnO and ES-Zn did not increase foliar content of Zn on maize and soybean as higher doses were applied indicating that there was not significant solubilization of these fertilizers during the first and the second growing seasons. For the millet, on the other hand, response to increasing doses was observed for all sources. Values of relative efficiency of absorption (REA) of Zn, considering $ZnSO_4$ a 100% soluble source, showed a progressive increase in REA for ES-Zn over time in both soil types. Despite low-solubility sources have potential to adequate supply Zn to crops in a medium-long term basis, the soluble source was found to be the most efficient during this study.

INTRODUÇÃO GERAL

A obtenção de altas produtividades tem sido um desafio frequente na agricultura brasileira, principalmente devido à baixa fertilidade natural dos solos que ocupam grandes extensões de áreas agricultáveis no país. Neste contexto, a adubação, incluindo os micronutrientes Zn e B, é imprescindível para correções das limitações do solo, adequar a nutrição das plantas e atingir maiores produtividades (Kirkby & Römheld., 2007). Os micronutrientes, embora exigidos em pequenas quantidades, são essenciais para as plantas completar seu ciclo vegetativo e, suas deficiências provocam redução na produtividade das culturas e qualidade dos produtos.

O fornecimento desses micronutrientes às culturas pode ser realizado: diretamente via solo, na forma de adubo; diretamente na planta, na forma de adubação foliar ou, por tratamento de sementes (Luchese et al. 2004). Embora, o solo seja primariamente a fonte de micronutrientes para as plantas e animais, possui fatores inerentes que estão quase sempre envolvidos em problemas de deficiência ou toxidez de micronutrientes para as plantas.

A interação desses elementos com a fração sólida do solo, as concentrações na solução do solo, e os fatores que afetam o equilíbrio entre essas duas formas, influenciará sua disponibilidade para as plantas. Segundo Consolini & Coutinho (2008), a disponibilidade de Zn é afetada por diversas reações que podem ocorrer no solo, incluindo hidrólises em pH elevados, reações de precipitação com fosfatos ou complexação pela matéria orgânica do solo, e a quimiosorção em oxidróxidos de Fe e Al, principalmente. Essas reações, refletem em frequentes observações de sintomas visuais de deficiência em áreas de produção agrícola. Além disso, a prática excessiva de calagem nas áreas de cultivo pode imobilizar e/ou indisponibilizar os micronutrientes para as plantas.

A eficiência das fertilizações com micronutriente é muito dependente da forma de aplicação e fonte utilizada. O fornecimento de Zn ou B de fontes solúveis, pode promover baixa disponibilidade do nutriente ao longo do tempo devido às reações mencionadas acima para o Zn, principalmente em solo argiloso oxídico ou a lixiviação de B em solos mais arenosos.

A adubação uniforme com micronutriente é um desafio operacional, pois as doses recomendadas são baixas. Por conta disso, é comum o fornecimento desses nutrientes em formulações como NPK + micro, ou com outras fontes de macronutrientes (Uréia + micro), que geralmente são incompatíveis quimicamente (Degryse et al., 2015), levando às reações

que disponibilizam o nutriente, destacando hidrolises e precipitação como fosfatos (Hettiarachchi et al., 2010).

O Enxofre elementar (S^0) tem sido usado recentemente em diversos processos de produção de fertilizantes, tais como, no revestimento da ureia, do superfostato triplo, do fosfato monoamônio e do cloreto de potássio. Estudos têm mostrado potencial agrônômico no desenvolvimento de fertilizantes oriundos da mistura, na forma de pastilhas, de micronutrientes com S^0 (Santos et al., 2017). Esses produtos apresentam como vantagens a maior concentração de nutrientes e o baixo custo de produção comparados às fontes tradicionais de micronutrientes. A oxidação do S no solo e consequente redução do pH em torno da pastilha (Horowitz 2003), poderá acelerar a solubilização de óxido de Zn, aumentando a absorção deste nutriente pelas plantas. Dessa forma, esses produtos poderão constituir uma nova forma de fornecimento eficiente de nutrientes para as plantas.

REFERÊNCIAS

- Consolini F, Coutinho ELM (2008) Efeito da aplicação de Zn e do pH do solo na disponibilidade do micronutriente - DOI: 10.4025/actasciagron.v26i1.1948. Acta Sci Agron 26:7–12. doi: 10.4025/actasciagron.v26i1.1948
- Degryse F, Baird R, McLaughlin M (2015) Diffusion and solubility control of fertilizer-applied zinc: chemical assessment and visualization. doi: 10.1007/s11104-014-2266-7
- Hettiarachchi Chemical Behavior of Fluid- and Granular-Mn and Zn Fertilizers in Alkaline Soils (PDF Download Available). https://www.researchgate.net/publication/236951316_Chemical_Behavior_of_Fluid-_and_Granular-Mn_and_Zn_Fertilizers_in_Alkaline_Soils. Accessed 28 Feb 2018
- Horowitz N (2003) Oxidação e eficiência agrônômica do enxofre elementar em solos do Brasil
- Luchese AV, Junior G, Celso A, et al (2004) Emergence and copper absorption by corn plant (*Zea mays*) replying the seed treatment with copper. Ciênc Rural 34:1949–1952. doi: 10.1590/S0103-84782004000600044
- Santos et al., (2017) Production and evaluation of a co-granulated elemental sulfur-micronutrient fertilizer. In: Int. Netw. Nat. Sci. - Res. J. <http://www.innspub.net/ijaar/production-evaluation-co-granulated-elemental-sulfur-micronutrient-fertilizer/>. Accessed 16 Feb 2018

CAPÍTULO 1

AVALIAÇÃO DE FERTILIZANTES PASTILHADOS CONTENDO ENXOFRE E BORO

RESUMO

A aplicação uniforme de micronutrientes é um desafio da agricultura. Além disso, as fontes disponíveis de B possuem características de solubilidade que devem ser melhor compreendidas em relação às suas eficiências ao longo dos cultivos. Fontes de liberação lenta podem ser vantajosas, pois ocorre a disponibilização dos nutrientes ao longo do tempo, evitando perdas ou excessos. Assim, objetivou-se estudar o desempenho de fontes de B em cultivos em sucessão de milho-soja-milheto. Para tal, conduziu-se ensaio em casa de vegetação, no esquema fatorial $2 \times (3 \times 3 + 1)$. Foram utilizadas amostras de solo arenoso e argiloso, três fontes de B (H_3BO_3 , Boráx e ES-B), três doses do nutriente (0,5, 1; e 2 mg dm^{-3} de B) e um tratamento controle, sem aplicação de B. A cada cultivo, determinou-se a matéria seca da parte aérea (MS), o teor foliar de B, o conteúdo foliar de B, a taxa de recuperação de B e a eficiência relativa de absorção de B. O conteúdo de B na planta aumentou linearmente com aplicação de B, para todas as fontes utilizadas. As fontes de B foram igualmente eficientes no suprimento de B para as plantas, não havendo diferenças estatísticas entre elas. A produção de MS foi maior no solo argiloso, enquanto que as demais variáveis respostas foram maiores no solo arenoso. Conclui-se que nas condições estudadas, as fontes utilizadas tiveram desempenho agrônômico equivalente em cultivos sucessivos (milho-soja-milheto).

Palavras-chave: Liberação lenta, oxidação do enxofre, micronutriente.

ABSTRACT

Uniform application of micronutrients is a challenge in modern agriculture. Available sources of B have different solubility patterns that are not well-understood, especially when it concerns nutrient uptake over several succession plantings. Slow-release sources could be more convenient since nutrient availability occurs throughout the growing seasons which avoids both nutrient loss and excess. Therefore, this work aimed to study the performance of different B sources in maize-soybean-millet succession. Trials were conducted in a greenhouse environment arranged in a $2 \times (3 \times 3 + 1)$ factorial scheme that consisted of two soils with different textures (a sandy and clayey soil), three B sources (H_3BO_3 , Boráx and ES-B), three B doses (0,5, 1; e 2 mg dm^{-3} of B) and a control treatment where no B fertilizer was

applied. Dry matter of the aerial plant part (DM), foliar content, foliar level, recovery rate and relative efficiency of absorption of B were determined for each crop in succession. Foliar B content increased linearly as higher doses of B fertilizer were applied, regardless the source used. The B sources tested were equally efficient in supplying B to the plants since no statistic differences were found between them. The different sources and doses of B tested did not show significant effect on the response variables. Only the foliar B content showed increased values as higher doses of this nutrient were applied, being more evident in the sandy soil. DM content observed was higher in the clayey soil while the resto of the response variables were higher in the sandy soil. It was concluded that the different B sources tested had similar agronomic performance in maize-soybean-millet succession.

Key-words: slow nutrient release, sulfur oxidation, micronutrient.

1.1 INTRODUÇÃO

A nutrição é um fator de grande influência na produtividade das culturas. Grande parte da agricultura brasileira tem se desenvolvido em solos de baixa fertilidade natural e que ocupam grandes extensões de áreas no país. No Brasil, solos deficientes em B são encontrados em várias regiões, com destaque para o Cerrado. Mesmo requerido em pequenas quantidades pelas plantas (Abd El-Wahab 2008), o B é nutriente indispensável para que as plantas completem seu ciclo e pode melhorar o rendimento das culturas (Quamruzzaman et al. 2017), sobretudo quando se almeja altas produtividades.

A distribuição uniforme de pequenas quantidades de B nas áreas de cultivo é um desafio operacional. O processo de granulação de fertilizantes contendo macronutrientes e micronutrientes permite uma aplicação única e uma distribuição mais uniforme em se tratando de micronutrientes (Shorrocks 1997). Por isso, é comum a adição de fontes de micronutrientes em formulações NPK (NPK + B), ou com fertilizantes simples (Ureia + B ou KCl + B). No entanto, problemas de segregação da mistura são frequentes.

A granulação de fertilizantes utilizando enxofre elementar (S^0) tem sido usada em diversos processos de produção de fertilizantes, tais como, no revestimento da ureia, do superfostato triplo, do fosfato monoamônio e do cloreto de potássio. Também estão em avaliação e desenvolvimento fertilizantes oriundos da mistura, na forma de pastilhas, de óxidos de Cu, Mn, Zn (Santos et al., 2017) ou de bórax e ulexita com S^0 . Esses produtos apresentam como vantagens a maior concentração de micronutrientes e o baixo custo de produção comparados às fontes solúveis destes. A oxidação do S presente nesses materiais

quando adicionados ao solo, irão conseqüentemente reduzir o pH em torno da pastilha (Mattiello et al. 2017), podendo dessa forma, solubilizar a ulexita, que irá lentamente liberar B, aumentando a eficiência de absorção deste nutriente pelas plantas.

Os fertilizantes de liberação lenta podem atender a demanda nutricional de todo ciclo da cultura através de uma única aplicação, diminuindo assim os custos (Shaviv 2000), podendo ser aplicados com segurança na agricultura.

Esses produtos contendo S⁰ enriquecidos com micronutriente, podem constituir uma alternativa econômica e eficiente de nutrientes para as plantas. No entanto, estudos são necessários para entender sua eficiência, sobretudo em sistemas de produção onde o efeito residual é de grande importância no manejo das culturas. Com isso, objetivou-se neste trabalho, avaliar a performance agrônômica de fontes de B de diferentes solubilidades em cultivos sucessivos milho-soja-milheto, em condições de casa de vegetação.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização do solo

Amostras de um solo arenoso (14% de argila) e de um solo argiloso (46% de argila), coletadas da camada de 0-20 cm, foram destorroadas e passadas em peneiras com malhas de 2 mm, para análise química, e 4 mm para montagem do ensaio.

O solo de textura arenosa possui as seguintes características químicas: pH (H₂O)= 5,92; Zn= 3,01 mg dm⁻³; B= 0,11 mg dm⁻³; S= 1,70 mg dm⁻³; t= 0,77 cmol_c dm⁻³; T (pH 7,0)= 3,17 cmol_c dm⁻³; matéria orgânica= 9,00 g kg⁻¹ e P-rem= 27,00 mg L⁻¹. Já o solo de textura argilosa, pH (H₂O)= 6,92; Zn= 0,78 mg dm⁻³; B= 0,17 mg dm⁻³; S= 3,00 mg dm⁻³; t= 1,33 cmol_c dm⁻³; T (pH 7,0)= 4,93 cmol_c dm⁻³; matéria orgânica= 5,20 g kg⁻¹ e P-rem= 8,90 mg L⁻¹.

A calagem foi realizada visando aumentar a saturação por base para 60%. Para tanto, os solos foram incubados com uma mistura de CaCO₃:MgCO₃ na proporção m/m de 4:1, durante 15 d, com umidade próxima à capacidade de campo.

Para avaliação da performance agrônômica de fontes de B, em cultivo sucessivo milho-soja-milheto, foi conduzido experimento em casa de vegetação do Departamento de Solos, da Universidade Federal de Viçosa.

O experimento foi realizado em esquema fatorial 2 × (3 × 3 + 1), sendo dois tipos de solos (arenoso e argiloso), três fontes de B (H₃BO₃, Boráx e ES-B), três doses do nutriente

(0,5; 1,0 e 2,0 mg dm⁻³ de B) e um tratamento controle, sem aplicação de B. O ES-B é um fertilizante co-pastilhado que contém S⁰ (770 g kg⁻¹ de S) e Ulexita (20 g kg⁻¹ de B). Os tratamentos foram distribuídos em blocos casualizados, com quatro repetições. Como unidade experimental utilizou-se um vaso de 4 dm³.

Após o período de incubação com corretivo de acidez, incorporou-se em todo o volume de solo superfosfato triplo (ST), considerando as doses 150 e 300 mg dm⁻³ de P, no solo arenoso e argiloso, respectivamente. As fontes de B foram aplicadas em quatro pontos equidistantes, a 5 cm de profundidade da superfície do solo.

Em seguida, foram semeadas cinco sementes de milho por vaso, fazendo-se após germinação o debaste para manter três plantas mais uniformes por vaso. Durante a condução do experimento, o fornecimento de água foi feito diariamente, mantendo a umidade do solo entre 80 e 100% da capacidade do campo. A adubação de cobertura foi dividida em três etapas, aos 8, 18 e 25 d após o plantio, quando foi aplicado 20, 40 e 40% das doses de nutrientes, respectivamente. A dose total de nutrientes aplicada no cultivo do milho correspondeu a 200 mg dm⁻³ de N (50% como Ureia e 50% como sulfato de amônio); 150 mg dm⁻³ K (KCl); 40 mg dm⁻³ de S (sulfato de amônio); 3,0 mg dm⁻³ Zn (ZnSO₄); 1,33 Cu (CuCl₂·2H₂O); 1,55 mg dm⁻³ de Fe (FeCl₃·6H₂O); 3,66 mg dm⁻³ de Mn (MnCl₂·4H₂O) e 0,15 mg dm⁻³ de Mo ((NH₄)₆ Mo₇O₂₄·4H₂O). As plantas foram colhidas 30 d após o plantio, cortando-as na região do colo.

Aos 12 d após a colheita da parte aérea do milho, em solo não revolvido, cinco sementes de soja ND 7300 foram semeadas. Cerca de 7 d após a germinação das plântulas, selecionaram-se as três mais uniformes. Realizou-se inoculação com *Bradyrhizobium spp.* aplicando-se uma suspensão bacteriana no colo das plantas. O fornecimento de água foi feito diariamente para manter a umidade do solo entre 80 e 100% da capacidade do campo. Foram realizadas duas fertilizações com Mn em cobertura, totalizando 1,83 mg dm⁻³ do nutriente. As plantas foram colhidas 60 d após o plantio, cortando-as na região do colo.

O milheto (BRS 1501) foi semeado 90 d após a colheita de soja, no solo não revolvido. Cerca de 5 d após a emergência das plântulas, selecionaram-se as três plantas mais uniformes. Como adubação de cobertura, aplicou-se 115 mg dm⁻³ de N (65% como ureia e 35% como sulfato de amônio), aos 12 e 28 d após plantio. As plantas de milheto foram conduzidas por 60 d, realizando-se 3 cortes sucessivos da parte aérea, a cada 20 d.

Dessa forma, o experimento teve duração total de 252 d, sendo 30, 60 e 60 d de cultivo de milho, soja e milheto, respectivamente e intervalos de 12 d entre milho-soja e 90 d entre os cultivos soja-milheto.

Preparo de amostras e análises de B

O material vegetal de cada cultura utilizada (milho, soja e milho), após colhido, foi levado à estufa de circulação forçada de ar a 65 °C. Após estabilização de massa, durante a secagem, os materiais foram pesados e moídos (moinho Wiley).

A mineralização dos materiais vegetais foi realizada por meio de digestão nítrico-perclórica (3:1 v/v), sendo nos extratos, a dosagem de B realizada por espectroscopia de emissão atômica, com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

O conteúdo de B na parte aérea das plantas foi calculado pelo produto da matéria seca e seu teor. Já a taxa de recuperação (TR) do elemento, foi calculada de acordo com a Eq. 1.

$$trNu_iPI (\%) = (cNu_{ij} - cNu_{i0}) / (qsNu_i) \times 100 \quad (\text{Eq.1})$$

sendo,

$trNu_iPI (\%)$ = taxa de recuperação do nutriente i pela planta

cNu_{ij} = conteúdo do nutriente i nas plantas no tratamento j, em mg vaso⁻¹;

cNu_{i0} = conteúdo médio do nutriente i nas plantas na dose 0, em mg vaso⁻¹;

$qaNu_{ij}$ = quantidade do nutriente i aplicada no tratamento j, em mg vaso⁻¹.

A eficiência relativa de absorção (ERA) foi calculada conforme a Eq. 2.

$$eraNu_iPI (\%) = (cNu_{ij} - cNu_{i0}) \times 100 / (cNu_{ir} - cNu_{i0}) \quad (\text{Eq.2})$$

sendo,

$eraNu_iPI (\%)$ = eficiência relativa de absorção do nutriente i pela planta,

cNu_{ij} = conteúdo do nutriente i nas plantas no tratamento j, em mg vaso⁻¹;

cNu_{i0} = conteúdo médio do nutriente i nas plantas na dose 0, em mg vaso⁻¹;

cNu_{ir} = conteúdo do nutriente i no tratamento referência, em mg vaso⁻¹.

Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância, sendo os efeitos das doses de B analisados por regressão, dos fertilizantes, por meio do teste Tukey (p < 0,05) e de solos, pelo teste F.

1.3 RESULTADOS

Não verificamos diferenças entre os fertilizantes para a produção de matéria seca (MS) do milho, soja, milho e conseqüentemente, no total dos cultivos (Tabela 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4). No entanto, observou-se diferenças na produção de MS entre os dois solos, para todos os cultivos e total (Tabelas 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4), sendo no solo argiloso a produção média de MS cerca de 1,3 vezes maior que no arenoso (Tabela 1.4). Comparando a produção de MS do tratamento controle com os fertilizantes, percebe-se valores muito próximos, indicando baixa resposta a adição dos fertilizantes considerando este parâmetro avaliado.

As diferentes fontes e doses de B não influenciaram seu respectivo teor foliar, em ambos os solos, para os cultivos de milho, milho, soja e total (Tabela 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4). Entretanto, a soja cultivada em solo arenoso apresentou maior teor de B quando a fonte foi o boráx (Tabela 1.2). Observou-se diferença entre solos em todos os cultivos (Tabela 1.1, 1.2 e 1.3), onde as plantas cultivadas em solo arenoso apresentaram maiores teores.

Concomitantemente à resposta do teor foliar, o conteúdo de B na parte aérea das plantas não foi influenciado pelas fontes e doses utilizadas (Tabela 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4). O solo também não influenciou o conteúdo de B na cultura da soja (Tabela 1.2). Comparando-se os solos, foram observadas diferenças apenas no conteúdo foliar de B no milho, no milho e no total (Tabela 1.1, 1.3 e 1.4), em que maior conteúdo foi propiciado em cultivo no solo arenoso. O solo arenoso, em geral, apresentou aumento no conteúdo de B, independente da fonte (Figuras 1.1 e 1.2). Observou-se efeito de dose de B, das diferentes fontes, no acúmulo do nutriente pela planta.

Em relação as doses aplicadas, os resultados de conteúdo de B mostram incremento linear para todos os fertilizantes nos dois tipos de solo, exceto para a soja em solo argiloso quando a fonte utilizada foi o H_3BO_3 que apresentou resposta raiz quadrática para esta variável (Figura 1.1).

Considerando o conteúdo acumulado de B nos três cultivos (Figura 1.3), percebe-se que houve aumento linear no acúmulo do elemento com o aumento da dose, em ambos os solos, entretanto as taxas variaram mais, entre as fontes, no solo arenoso. De fato, enquanto no solo argiloso as inclinações dos modelos foram de 0,76, 0,97 e 1,01 para o Boráx, ES-B e H_3BO_3 , respectivamente, em solo arenoso, obedecendo a mesma sequencia de fertilizantes as taxas foram de 2,79, 1,64 e 1,97, destacando em ambas as condições a superioridade do boráx.

Seguindo os resultados de conteúdo, a taxa de recuperação (TR) foi influenciada apenas pelo tipo de solo, exceto para a cultura da soja, onde não houve diferença significativa entre os tratamentos (Tabela 1.2). Existiu diferença para milho, milho e total (Tabela 1.1, 1.3 e 4), apresentando-se TR 2,2; 2,4 e 2,0 vezes maiores para o solo arenoso quando

comparado as taxas obtidas em cultivo em solo argiloso. A redução na TR de B ao longo do tempo reflete a sua absorção pelas plantas nos cultivos anteriores. Entretanto, as diferentes espécies possuem diferentes demandas e capacidade de absorção. Diferentemente se fosse três cultivos da mesma espécie.

O solo arenoso em geral, apresentou aumento no conteúdo de boro independente da fonte (Figuras 1.1 e 1.2). Observou-se efeito de dose de B, das diferentes fontes, no acúmulo do nutriente pela planta.

Tabela 1.1: Produção de matéria seca, teor de B, conteúdo de B e taxa de recuperação de B no milho, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.

Dose (mg dm ⁻³)	Solo argiloso			Solo arenoso		
	H ₃ BO ₃	Boráx	ES-B	H ₃ BO ₃	Boráx	ES-B
Matéria seca de parte aérea (g vaso ⁻¹)						
0	42,34			34,33		
0,5	46,02	44,24	45,84	31,15	30,35	34,28
1	41,65	41,56	39,34	31,23	33,61	33,43
2	41,70	40,56	42,50	34,51	32,13	31,83
Média de fontes	43,12 a	43,31 a	42,56 a	32,29 a	33,05 a	33,18 a
Média de Solos	42,94			32,99***		
Teor de B (mg kg ⁻¹)						
0	14,07			15,81		
0,5	21,09	17,82	17,70	60,04	49,42	43,72
1	27,59	24,76	31,92	53,82	86,99	55,97
2	34,51	42,96	33,48	106,43	143,98	96,87
Média de fontes	27,73 a	28,51 a	27,70 a	73,43 a	93,46 a	65,52 a
Média de Solos	26,59			71,30***		
Conteúdo de B (mg vaso ⁻¹)						
0	0,60			0,54		
0,5	0,95	0,86	0,82	1,80	1,49	1,52
1	1,15	1,05	1,24	1,68	2,90	1,87
2	1,44	1,75	1,39	3,59	4,61	3,09
Média de fontes	1,18 a	1,22 a	1,15 a	2,36 a	3,12 a	2,16 a
Média de Solos	1,13			2,35***		
Taxa de Recuperação de B (%)						
0,5	32,80	12,12	21,32	63,0	39,78	49,29
1	17,61	15,20	16,20	28,74	49,34	33,38
2	15,15	15,75	9,97	38,21	42,41	31,92
Média de fontes	21,85 a	14,36 a	15,83 a	43,31 a	43,85 a	38,20 a
Média de Solos	17,35			41,78***		

Tabela 1.2: Produção de matéria seca, teor de B, conteúdo de B e taxa de recuperação de B na soja, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.

Dose (mg dm ⁻³)	Solo argiloso			Solo arenoso		
	H ₃ BO ₃	Boráx	ES-B	H ₃ BO ₃	Boráx	ES-B
Matéria seca de parte aérea (g vaso ⁻¹)						
0	13,66			11,03		
0,5	17,42	16,35	17,72	12,16	12,67	13,78
1	17,03	15,69	17,20	12,84	13,47	13,00
2	13,88	15,21	16,48	12,49	10,66	12,80
Média de fontes	16,11 a	15,76 a	17,13 a	12,50 a	12,27 a	13,19 a
Média de Solos	16,06			12,61***		
Teor de B (mg kg ⁻¹)						
0	25,54			26,95		
0,5	52,40	50,55	37,11	66,94	61,89	51,68
1	65,87	69,38	54,04	65,91	68,92	60,45
2	74,90	73,93	80,61	92,90	129,53	78,86
Média de fontes	64,39 a	64,62 a	57,25 a	75,25 a	86,78 b	63,66 a
Média de Solos	58,43			70,21**		
Conteúdo de B (mg vaso ⁻¹)						
0	0,34			0,29		
0,5	0,87	0,81	0,65	0,81	0,77	0,70
1	1,13	1,08	0,92	0,86	0,92	0,77
2	1,02	1,14	1,32	1,16	1,37	0,99
Média de fontes	1,01 a	1,01 a	0,96 a	0,94 a	1,02 a	0,84 a
Média de Solos	0,93			0,87 ^{ns}		
Taxa de Recuperação de B (%)						
0,5	26,09	19,26	15,13	26,23	20,35	20,64
1	19,52	15,31	14,44	14,25	13,15	12,12
2	8,43	8,24	12,20	10,97	11,15	8,85
Média de fontes	18,01 a	14,27 a	13,92 a	17,15 a	14,88 a	13,87 a
Média de Solos	15,40			15,30 ^{ns}		

Tabela 1.3: Produção de matéria seca, teor de B, conteúdo de B e taxa de recuperação de B no milho, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.

Dose (mg dm ⁻³)	Solo argiloso			Solo arenoso		
	H ₃ BO ₃	Boráx	ES-B	H ₃ BO ₃	Boráx	ES-B
Matéria seca de parte aérea (g vaso ⁻¹)						
0	23,42			19,42		
0,5	21,57	23,68	22,73	19,69	20,65	20,01
1	23,46	23,09	23,38	20,27	20,16	21,02
2	22,33	22,40	22,93	20,35	19,65	19,55
Média de fontes	22,46 a	23,47 a	23,01 a	20,11 a	20,16 a	20,19 a
Média de Solos	23,03			20,08***		
Teor de B (mg kg ⁻¹)						
0	7,77			10,28		
0,5	10,09	10,94	14,30	21,22	14,22	12,03
1	11,85	10,76	12,52	20,52	17,08	16,51
2	10,52	14,95	15,31	30,23	43,19	22,67
Média de fontes	10,82 a	12,22 a	12,63 a	23,99 a	24,83 a	17,07 a
Média de Solos	11,91			20,80 ***		
Conteúdo de B (mg vaso ⁻¹)						
0	0,22			0,21		
0,5	0,23	0,27	0,30	0,29	0,43	0,25
1	0,28	0,25	0,31	0,38	0,41	0,35
2	0,23	0,35	0,37	0,77	0,59	0,43
Média de fontes	0,25 a	0,30 a	0,32 a	0,48 a	0,46 a	0,34 a
Média de Solos	0,28			0,41***		
Taxa de Recuperação de B (%)						
0,5	0,44	2,21	0,72	2,60	2,52	0,54
1	1,49	0,69	2,07	4,28	4,19	3,77
2	1,25	1,35	1,82	3,78	4,42	2,34
Média de fontes	1,06 a	1,41 a	1,54 a	3,55 a	3,71 a	2,22 a
Média de Solos	1,34			3,16 ***		

Tabela 1.4: Produção de matéria seca, teor de B, conteúdo de B e taxa de recuperação de B totais, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.

Dose (mg dm ⁻³)	Solo argiloso			Solo arenoso		
	H ₃ BO ₃	Boráx	ES-B	H ₃ BO ₃	Boráx	ES-B
Matéria seca de parte aérea (g)						
0	79,43			64,79		
0,5	85,03	89,06	86,31	63,02	63,69	68,08
1	82,15	80,36	79,93	64,35	67,26	68,62
2	77,92	78,18	81,92	67,35	65,50	64,19
Média de fontes	81,7 a	82,53 a	82,72 a	64,91 a	65,48 a	66,96 a
Média de Solos	82,03			65,68***		
Conteúdo de B (mg)						
0	1,16			1,05		
0,5	2,06	1,95	1,78	3,04	2,56	2,48
1	2,56	2,39	2,48	2,96	4,21	3,05
2	2,70	3,24	3,09	5,36	7,13	4,52
Média de fontes	2,44 a	2,53 a	2,45 a	3,79 a	4,63 a	3,35 a
Média de Solos	2,34			3,64***		
Taxa de Recuperação de B (%)						
0,5	46,39	28,82	31,76	91,83	60,23	70,61
1	40,10	25,37	33,11	45,66	64,67	47,17
2	20,07	16,58	24,53	51,19	55,39	41,99
Média de fontes	35,52 a	23,58 a	29,79 a	62,89 a	60,10 a	53,25 a
Média de Solos	29,63			58,74***		

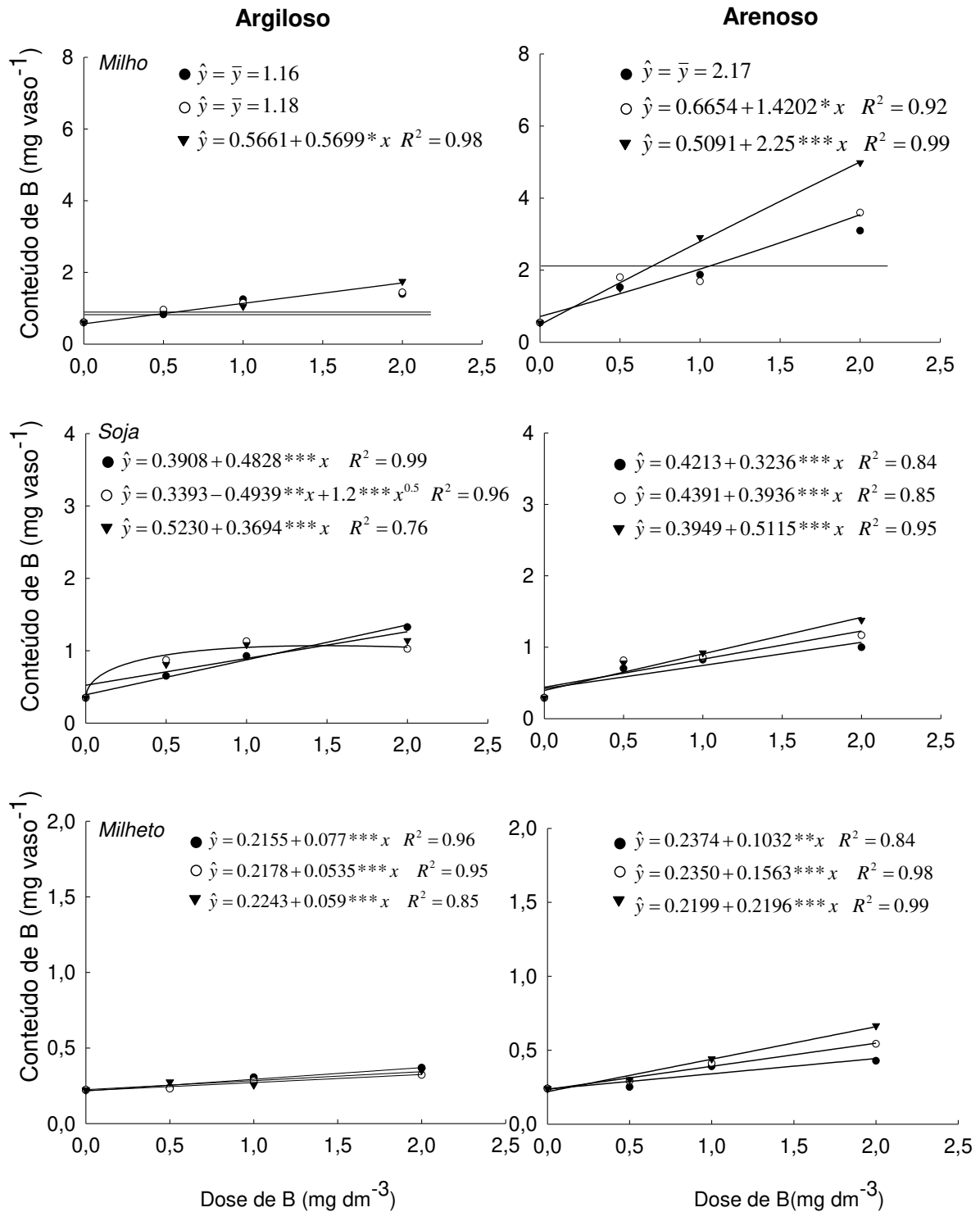


Figura 1.1 Conteúdo de B na parte aérea do milho, soja e milho, em função de doses de B aplicado via solo, considerando as fontes ES-B (●); H₃BO₃ (○) e Bórax (▼), em solos de textura argilosa e arenosa. O ES-B trata-se de um fertilizante co-pastilhado que contém S⁰ (770 g kg⁻¹ de S) e ulexita (20 g kg⁻¹ de B).

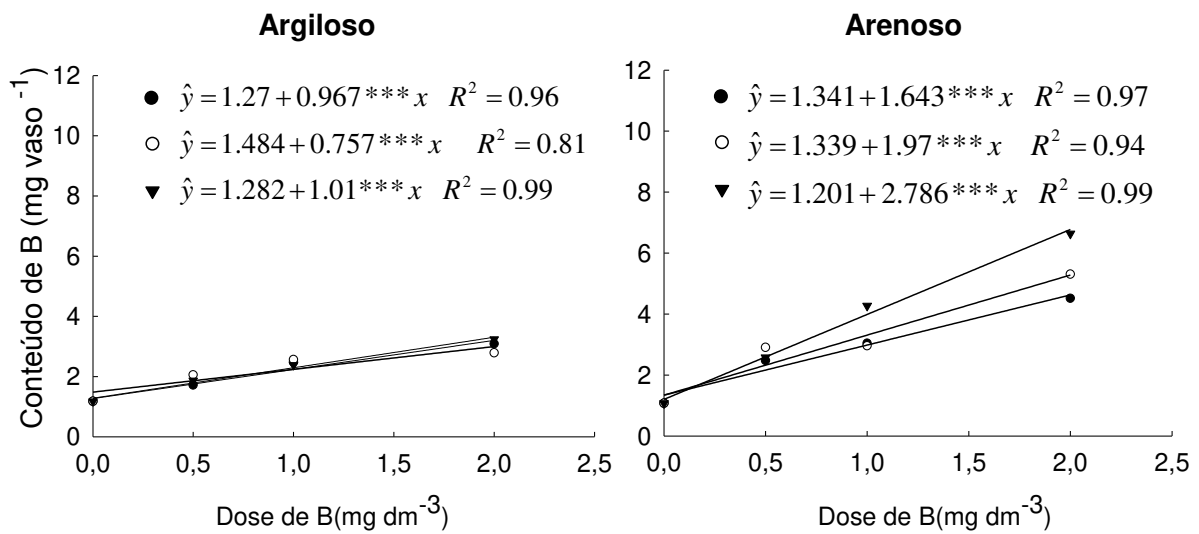


Figura 1.2 Conteúdo total de B na parte aérea, em função de doses de B aplicado via solo, considerando as fontes ES-B (●); H₃BO₃ (○) e Bórax (▼), em solos de textura argilosa e arenosa. O ES-B trata-se de um fertilizante co-pastilhado que contém S⁰ (770 g kg⁻¹ de S) e ulexita (20 g kg⁻¹ de B).

Os valores de eficiência relativa de absorção (ERA) obtiveram comportamento diferente entre os dois solos. No solo argiloso, nos dois primeiros cultivos, o H₃BO₃ e boráx, apresentaram eficiência semelhante, enquanto que o ES-B, a eficiência foi menor. Já no cultivo do milho, a ERA do boráx foi maior que o H₃BO₃, e ES-B o foi superior às outras duas fontes. Ao final dos cultivos, comparando ao H₃BO₃, o boráx apresentou-se 1,7 vezes maior no solo argiloso e o ES-B com igual comportamento à fonte solúvel. No entanto, no solo arenoso, o boráx se sobressaiu às demais fontes em todos os cultivos, já para o ES-B houve decréscimo da ERA (Figura 1.3).

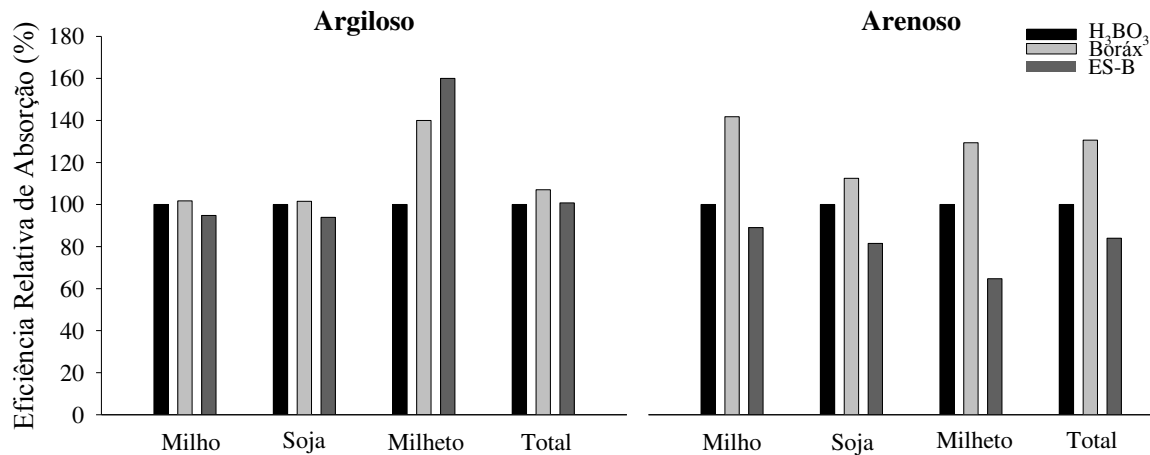


Figura 1.3 Eficiência relativa de absorção de B no milho, soja, milheto e total, considerando as fontes H₃BO₃, Bórax e ES-B em solos de textura argilosa e arenosa. O ES-B trata-se de um fertilizante co-pastilhado que contém S₀ (770 g kg⁻¹ de S) e ulexita (20 g kg⁻¹ de B).

1.4 DISCUSSÃO

O B tem sido um nutriente importante nos programas de adubação, especialmente para culturas como café, eucalipto, hortaliças e espécies futíferas. As fontes de B variam em solubilidade em água, sendo 20,0, 11,0 g L⁻¹ para H₃BO₃, boráx, respectivamente. A ulexita é uma fonte muito utilizada em formulados e é considerada insolúvel em água. Fontes de menor solubilidade ou insolúveis em água apresentam menor custo, por serem menos processadas industrialmente. Os resultados desse trabalho mostram que o bórax apresentou performance semelhante ao ácido bórico, seja a curto ou médio prazo. Assim, na escolha da fonte de B a ser utilizada deve-se levar em consideração o custo e a possibilidade de perdas por lixiviação (fonte mais solúvel), quando as condições ambientais as favoreçam, tais como solos mais arenosos e períodos chuvosos.

No solo, o B apresenta-se combinado com oxigênio e está na forma de H₃BO₃, principalmente, sendo esta a forma absorvida pelas plantas (Abreu et al., 2007). Todavia, sua disponibilidade é dependente do pH, teor de argila e teor de matéria orgânica do solo. Este encontra-se mais disponível na faixa de pH entre 5 e 7, em solos menos argilosos e com maior teor de matéria orgânica (Abreu et al., 2007). O valor de pH de ambos solos (pH argiloso = 6,92; pH arenoso = 5,92) estavam dentro da faixa ótima de disponibilidade. Todavia, o solo argiloso é mais tamponado quanto ao B (Ferreira et al., 2001) e o utilizado possuía menor teor de matéria orgânica.

A maior produção de MS dos cultivos no solo argiloso, deve-se ao fato de esse tipo de solo reunir propriedades mais favoráveis ao crescimento de plantas, como maior CTC e retenção de água, o que favorece a absorção de nutrientes pelas plantas e assim maior crescimento.

A menor retenção de água no solo promove maior concentração de B no tecido vegetal (Mattiello et al. 2009). Assim as plantas cultivadas no solo arenoso apresentaram maior teor de B e conseqüentemente maior conteúdo. Outro fato que pode ter ocasionado isso é o efeito de diluição de B nas plantas de solo argiloso ter sido maior, devido maior produção de MS.

A maior absorção de B pelas plantas, associada às maiores taxas de recuperação observadas no solo arenoso, também foram encontradas na cultura da soja por (Pegoraro et al. 2008) em solos arenosos. O fato do solo de textura argilosa não ter apresentado a mesma observação, possivelmente, se dá pela maior presença de minerais de caulinita e óxidos (Neto et al. 2015) aumentando a capacidade de adsorção do B adicionado (Alleoni & Camargo, 2000); (Ferreira et al., 2001; Abreu et al., 2007). A redução na TR de B ao longo do tempo reflete a sua absorção pelas plantas nos cultivos anteriores. Entretanto, as diferentes espécies possuem diferentes demandas e capacidade de absorção. Diferentemente se fosse três cultivos da mesma espécie.

Tanto para o milho quanto para a da soja, os teores foliares foram maiores que os valores referência presentes na literatura (Urano et al., 2007; Kurihara et al., 2013; Gott et al., 2017). O fato da presente pesquisa ter sido realizada em vasos pode ter contribuído para este excesso de de B no tecido, visto que o efeito limitante de vaso proporcionou que as raízes preenchessem todo volume de solo possível, absorvendo o máximo de nutriente possível. Este “consumo de luxo” de B que as plantas tiveram, presente em todos tratamentos, pode ser outro motivo que culminou na não detecção de diferença significativa entre as fontes e doses testadas. Assim, a principal diferença se deu em função das características físicas e químicas dos diferentes solos utilizados.

Em trabalho realizado em casa de vegetação, (Leite et al., 2003) também notaram excesso de acúmulo de B na parte aérea de milho. Neste trabalho, em solo arenoso, eles utilizaram como fonte bórax e notaram altos teores foliares de B, corroborando com nosso trabalho, onde esta fonte foi a que propiciou maiores valores absolutos de teor e maior incremento linear de conteúdo em função das doses.

Apesar de teoricamente o bórax ser uma fonte menos solúvel que o H_3BO_3 (Abreu et al., 2007), as condições de cultivo propiciaram solubilização ao longo do tempo, aumentando a

concentração de B na solução do solo. O mesmo aconteceu para o ES-B, que mesmo havendo o co-pastilhamento, não se observou retardamento da liberação de B.

A utilização de fertilizantes co-pastilhados contendo ES-B apresentam-se como boa alternativa, pois sua aplicação na forma de pastilha se torna mais fácil. Além disso, é uma fonte de menor custo quando comparado à fontes solúveis como H_3BO_4 ,

1.5 CONCLUSÕES

As fontes utilizadas apresentaram performance agronômica semelhantes para o cultivo em sucessão de milho, soja e milheto. Assim, na escolha da fonte de B deve-se levar em consideração os fatores econômicos, a forma de aplicação e a distribuição homogênea na área.

1.6 REFERÊNCIAS

- Abd El-Wahab MA (2008) Effect of some trace elements on growth, yield and chemical constituents of *Trachyspermum ammi* L. plants under Sinai conditions. *Res J Agric Biol Sci* 4:717–724
- Alleoni LRF, Camargo OAD (2000) Boron adsorption in soils from the State of São Paulo, Brazil. *Pesqui Agropecuária Bras* 35:413–421. doi: 10.1590/S0100-204X2000000200020
- Alvarez V. VH, Novais RF, Barros NF, Cantarutti RB e Lopes AS (último) Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação
- Dell B, Huang L (1997) Physiological response of plants to low boron. *Plant Soil* 193:103–120. doi: 10.1023/A:1004264009230
- Ferreira GB, Fontes RLF (2001) Influência de algumas características do solo nos teores de boro disponível.
- Gott RM, Carvalho AMX, Xavier FO, et al (2017) Foliar Diagnosis Indexes for Corn by the Methods Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) and Nutritional Composition (CND). *Commun Soil Sci Plant Anal*
- Jahiruddin M, Harada H, Hatanaka T, Sunaga Y (2001) Adding boron and zinc to soil for improvement of fodder value of soybean and corn. *Commun Soil Sci Plant Anal* 32:2943–2951. doi: 10.1081/CSS-120000973
- Kurihara CH, Venegas VHA, Neves JCL, et al (2013) Faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes em algodão e em soja, definidas em função de índices DRIS. *Rev Ceres* 60:412–419. doi: 10.1590/S0034-737X2013000300015

- Leite UT, Aquino BF de, Rocha RNC, Silva J da (2006) Níveis críticos foliares de Boro, Cobre, Manganês e Zinco em milho. *Biosci J* 19:
- Marshener, H (1995) Book Reviews. *Plant Cell Environ* 11:147–148. doi: 10.1111/j.1365-3040.1988.tb01130.x
- Mattiello EM, da Silva RC, Degryse F, et al (2017) Sulfur and Zinc Availability from Co-granulated Zn-Enriched Elemental Sulfur Fertilizers. *J Agric Food Chem* 65:1108–1115. doi: 10.1021/acs.jafc.6b04586
- Mattiello EM, Ruiz HA, Silva IR da, et al (2009) Transporte de boro no solo e sua absorção por eucalipto. *Rev Bras Ciênc Solo* 33:1281–1290. doi: 10.1590/S0100-06832009000500021
- Neto S, Dos JA, Fontes RLF, et al (2015) TAXAS DE RECUPERAÇÃO DE BORO POR EXTRATORES EM SOLOS DA BAHIA E DE MINAS GERAIS, NA PRESENÇA E AUSÊNCIA DE CALAGEM. *Rev Bras Ciênc Solo* 39:1121–1126. doi: 10.1590/01000683rbc20140669
- Pegoraro RF, Neto S, Dos JA, et al (2008) Soybean growth in response to boron dosages, liming and soil texture. *Ciênc E Agrotecnologia* 32:1092–1098. doi: 10.1590/S1413-70542008000400009
- Quamruzzaman M, Ullah MJ, Karim MF, et al (2017) Physiological Growth and Yield of Two Groundnut Varieties as Influenced by Light and Boron. *Not Sci Biol* 9:280–286. doi: 10.15835/nsb9210088
- Santos et al., (2017) Production and evaluation of a co-granulated elemental sulfur-micronutrient fertilizer. In: *Int. Netw. Nat. Sci. - Res. J.* <http://www.innspub.net/ijaar/production-evaluation-co-granulated-elemental-sulfur-micronutrient-fertilizer/>. Accessed 16 Feb 2018
- Shaviv A (2000) Advances in controlled-release fertilizers. *Adv Agron* 71:1–49. doi: 10.1016/S0065-2113(01)71011-5
- Shorrocks VM (1997) The occurrence and correction of boron deficiency. *Plant Soil* 193:121–148. doi: 10.1023/A:1004216126069
- Sousa DMG, Lobato E (2002) Cerrado: Correção do solo e adubação. http://livraria.sct.embrapa.br/liv_resumos/pdf/00074640.pdf. Accessed 16 Apr 2018
- Urano EOM, Kurihara CH, Maeda S, et al (2007) Determinação de teores ótimos de nutrientes em soja pelos métodos chance matemática, sistema integrado de diagnose e recomendação e diagnose da composição nutricional. *Rev Bras Ciênc Solo* 31:63–72. doi: 10.1590/S0100-06832007000100007 Cap 2

CAPÍTULO 2

AVALIAÇÃO AGRONÔMICA DE FONTES DE Zn DE DIFERENTES SOLUBILIDADES

RESUMO

Fertilizantes que contenham enxofre elementar (ES) e ZnO, podem apresentar-se como tecnologia para o suprimento lento e com efeito residual desses nutrientes para as culturas. Avaliou-se fertilizantes solúveis e insolúveis contendo S e Zn (ZnSO_4 , ZnO e ES-Zn), em solo arenoso e argiloso, em cultivo sucessivo de milho-soja-milheto durante 252 d. Não houve efeito significativo de fontes na produção de matéria seca. O teor e conteúdo de Zn foi maior com aplicação de ZnSO_4 . A taxa de recuperação de Zn pelos cultivos foi afetada pelos diferentes fertilizantes, de forma diferenciada nos cultivos. O ZnSO_4 foi a fonte mais eficiente para fornecimento de Zn, nos cultivos de soja e milho. O ZnO e ES-Zn não incrementaram o conteúdo de Zn com o aumento de suas doses, nos dois primeiros cultivos, indicando baixa solubilização a curto prazo. Por outro lado, no milheto, houve resposta ao aumento da dose de Zn para todos os fertilizantes. Os valores de eficiência relativa de absorção (ERA), considerando a fonte solúvel ZnSO_4 como 100 %, mostram que, ao longo do tempo, houve aumento progressivo na ERA para o fertilizante ES-Zn, em ambos os solos. O ES-Zn é um fertilizante de liberação lenta, suprindo nutrientes para as plantas a médio e longo prazo. Novos estudos são necessários para avaliação em tempos maiores que aqueles usados neste experimento.

Palavras chave: Fertilizantes, liberação lenta, oxidação do enxofre, micronutriente.

ABSTRACT

Fertilizers containing S^0 + ZnO could be a good alternative to supply these nutrients to plant crops. Soluble and insoluble fertilizers containing S and Zn (ZnSO_4 , ZnO and ES-Zn) were tested in two different soil types (sandy and clayey soil) in maize-soybean-millet succession during 252 days. Significant effects of Zn sources on plant dry matter content were not observed. Effect on foliar level and foliar content of Zn was found when the fertilizer ZnSO_4 was applied. Recovery rate of Zn was affected by the different Zn sources used and showed different behavior for each crop in succession. ZnSO_4 was the most efficient source in providing Zn for maize and soybean. ZnO and ES-Zn did not increase foliar content of Zn on maize and soybean as higher doses were applied indicating that there was not significant

solubilization of these fertilizers during the first and the second growing seasons. For the millet, on the other hand, response to increasing doses was observed for all sources. Values of relative efficiency of absorption (REA) of Zn, considering ZnSO₄ a 100% soluble source, showed a progressive increase in REA for ES-Zn over time in both soil types. Low-solubility fertilizers have shown to be effective sources of Zn to crops. More studies involving this nutrient source should, however, be carried out to reinforce the results found.

Key-words: fertilizers, slow nutrient release, sulfur oxidation, micronutrient.

2.1 INTRODUÇÃO

O zinco (Zn) é um micronutriente que desempenha papel fundamental no crescimento das plantas. Dentre as funções destaca-se cofator ou ativador enzimático, síntese de auxinas, fotossíntese, respiração e assimilação do nitrogênio (Cakmak., 2008; Jamami et al., 2008).

Cerca de metade dos solos agrícolas do mundo, geralmente ricos em calcários e oxidróxidos de Fe e Al, ou oriundos de material de origem pobre em Zn, destinados ao cultivo de cereais, são deficientes em Zn (Alloway, 2008). Além disso, vários atributos do solo podem afetar a disponibilidade de Zn para as plantas, sendo a quimiosorção em argilas oxídicas e complexação pela matéria orgânica os principais mecanismos de retenção do elemento no solo (Casagrande et al., 2008). A matéria orgânica é um adsorvente importante para Zn, especialmente quando o pH do solo situa-se abaixo de 7, podendo diminuir a biodisponibilidade do elemento (Fan et al., 2016).

Fertilizações via solo com Zn, têm sido realizadas com fontes solúveis, como sulfatos e cloretos. Entretanto, nos últimos anos devido ao menor preço e menor problema de incompatibilidade físico-química, também tem-se utilizado o ZnO, geralmente misturado a formulados NPK. Estudos recentes têm mostrado potencial agrônômico no uso de fontes de Zn de baixa solubilidade em água, como o ZnO de forma isolada ou compondo um fertilizante co-granulado obtido da mistura de ZnO e enxofre elementar (Mattiello et al., 2017; Santos et al., 2017).

A co-granulação do enxofre elementar (S⁰) com o ZnO tem-se mostrado efetiva no retardamento da liberação de Zn e S, podendo ser vantajosa devido ao maior efeito residual (Mattiello et al., 2017). A presença do S⁰ nesses fertilizantes é importante para o suprimento de S para os cultivos, já que formulados NPK com baixas concentrações ou ausência de S são preferenciais. Assim, com certa frequência, tem-se reportado a deficiência de S em muitos cultivos agrícolas.

O uso de fontes de Zn de baixa solubilidade ainda precisa de maior suporte científico, devido ao pequeno número de publicações recentes com essa temática. Neste sentido, objetivou-se avaliar fontes de Zn de diferentes solubilidades em cultivo sucessivo milho-soja-milheto.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Preparo do solo

Amostras de um solo arenoso (14 % de argila) e um argiloso (46 % de argila) foram, coletadas da camada de 0-20 cm, que foram destorroadas e passadas em peneiras com malhas de 2 mm, para análise química, e 4 mm para montagem do ensaio.

O solo de textura arenosa apresentou pH (H₂O)= 5,92; Zn= 3,01 mg dm⁻³; B= 0,11 mg dm⁻³; S= 1,7 mg dm⁻³; t= 0,77 cmol_c dm⁻³; CTC pH 7,0= 3,17 cmol_c dm⁻³; matéria orgânica= 9,0 g kg⁻¹ e P-rem= 27 mg L⁻¹. Para solo de textura argilosa, pH (H₂O)= 6,92; Zn= 0,78 mg dm⁻³; B= 0,17 mg dm⁻³; S= 3,0 mg dm⁻³; t= 1,33 cmol_c dm⁻³; CTC pH 7,0 = 4,93 cmol_c dm⁻³; matéria orgânica= 5,2 g kg⁻¹ e P-rem= 8,9 mg L⁻¹.

A calagem foi realizada visando aumentar a saturação por bases para 60%. Para tanto, os solos foram incubados com uma mistura de CaCO₃:MgCO₃ na proporção m/m de 4:1, durante 15 d, com umidade próxima à capacidade de campo. Após o período de incubação, incorporou-se em todo o volume de solo o fertilizante superfosfato triplo (ST) considerando as doses 150 e 300 mg dm⁻³ de P, no solo arenoso e argiloso, respectivamente.

Ensaio

Para avaliação da performance agrônômica de fontes de Zn, em cultivo sucessivo milho-soja-milheto, foi conduzido experimento em casa de vegetação do Departamento de Solos, da Universidade Federal de Viçosa-UFV.

O experimento foi realizado em esquema fatorial 2 × (3 × 3 +1), sendo dois tipos de solos (argiloso e arenoso), três fontes de Zn (ZnSO₄, ZnO e ES-Zn), três doses do nutriente (1,5; 3 e 6 mg dm⁻³ de Zn) e um tratamento controle, sem aplicação de Zn. O ES-Zn é um fertilizante co-pastilhado que contém S⁰ (785 g kg⁻¹ de S) e ZnO (50 g kg⁻¹ de Zn). Os tratamentos foram distribuídos em blocos casualizados, com quatro repetições. Como unidade experimental utilizou-se um vaso de 4 dm⁻³ com três plantas.

Como primeiro cultivo, utilizou-se o milho híbrido Biomatrix BMB 20. O plantio foi realizado no início de março de 2017. Os tratamentos (fertilizantes) foram aplicados de forma

localizada em quatro pontos equidistantes a ~5 cm de profundidade da superfície do solo, no momento do plantio, quando foram semeadas cinco sementes por vaso. Cerca de oito dias após emergência das plântulas, selecionaram-se as três plantas mais uniformes por vaso.

Durante a condução do experimento, o fornecimento de água foi feito diariamente, mantendo a umidade do solo entre 80 e 100% da capacidade do campo. A adubação de cobertura foi dividida em três etapas, aos 8, 18 e 25 d após o plantio, quando foi aplicado 20, 40 e 40% das doses de nutrientes, respectivamente. A dose total de nutrientes correspondeu a 200 mg dm⁻³ de N (50% como Ureia e 50% como sulfato de amônio); 150 mg dm⁻³ K (KCl); 40 mg dm⁻³ de S (sulfato de amônio); 2,0 mg dm⁻³ de B (H₃BO₃); 1,33 mg dm⁻³ de Cu (CuCl₂. 2H₂O); 1,55 mg dm⁻³ de Fe (FeCl₃.6H₂O); 3,66 mg dm⁻³ de Mn (MnCl₂. 4H₂O) e 0,15 mg dm⁻³ de Mo ((NH₄)₆ Mo₇O₂₄.4H₂O).

As plantas foram colhidas aos 30 d após o plantio, cortando-as na região do colo.

Aos 12 d após a colheita da parte aérea do milho, em solo não revolvido, cinco sementes de soja (ND 7300) foram semeadas. Cerca de 7 d após a emergência das plântulas, selecionaram-se as três mais uniformes. Realizou-se inoculação com *Bradyrhizobium* aplicando-se uma suspensão bacteriana no colo das plantas.

O fornecimento de água foi feito diariamente para manter a umidade do solo entre 80 e 100% da capacidade do campo. Foram realizadas duas fertilizações com Mn em cobertura, totalizando 1,83 mg dm⁻³ do nutriente.

As plantas foram colhidas aos 60 d após o plantio, cortando-as na região do colo.

O milho (BRS 1501) foi semeado 90 d após a colheita de soja, em solo não revolvido. Cerca de 5 d após a emergência das plântulas, selecionaram-se as três plantas mais uniformes. Como adubação de cobertura, aplicou-se 115 mg dm⁻³ de N (65% como ureia e 35% como sulfato de amônio), aos 12 e 28 d após plantio.

As plantas de milho foram conduzidas por 60 d, realizando-se 3 cortes sucessivos da parte aérea, a cada 20 d. Dessa forma, o experimento teve duração total de 252 d, sendo 30, 60 e 60 d de cultivo de milho, soja e milho, respectivamente e intervalos de 12 d entre milho-soja e 90 d entre os cultivos soja-milho.

Preparo de amostras e análises de Zn

O material vegetal de cada cultura (milho, soja e milho), após colhido, foi levado à estufa de circulação forçada de ar a 65 °C. Após estabilização de massa, os materiais foram pesados e moídos (moinho Wiley).

A mineralização dos materiais vegetais foi realizada por meio de digestão nítrico-perclórica (3:1 v/v), sendo nos extratos, a dosagem de Zn realizada por espectroscopia de emissão atômica, com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

O conteúdo de Zn na parte aérea das plantas foi calculado pelo produto da matéria seca e seu teor. Já as taxas de recuperação (TR) do elemento, foram calculadas de acordo com a Eq. 1.

$$trNu_iPI (\%) = (cNu_{ij} - cNu_{i0}) / (qsNu_i) \times 100 \quad (\text{Eq.1})$$

sendo,

$trNu_iPI (\%)$ = taxa de recuperação do nutriente i pela planta

cNu_{ij} = conteúdo do nutriente i nas plantas no tratamento j, em mg vaso⁻¹;

cNu_{i0} = conteúdo médio do nutriente i nas plantas na dose 0, em mg vaso⁻¹;

$qaNu_i$ = quantidade do nutriente i aplicada no tratamento j, em mg vaso⁻¹.

A eficiência relativa de absorção (ERA) foi calculada conforme a Eq. 2.

$$eraNu_iPI (\%) = (cNu_{ij} - cNu_{i0}) \times 100 / (cNu_{ir} - cNu_{i0}) \quad (\text{Eq.2})$$

sendo,

$eraNu_iPI (\%)$ = eficiência relativa de absorção do nutriente i pela planta,

cNu_{ij} = conteúdo do nutriente i nas plantas no tratamento j, em mg vaso⁻¹;

cNu_{i0} = conteúdo médio do nutriente i nas plantas na dose 0, em mg vaso⁻¹;

cNu_{ir} = conteúdo do nutriente i no tratamento referência, em mg vaso⁻¹.

Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância. O teste F foi conclusivo para o fator solo. O efeito das doses de Zn foram analisados por meio de regressão e o fator fonte, por meio do teste Tukey (p < 0,05).

2.3 RESULTADOS

A produção de MS foi maior no solo argiloso do que no arenoso, porém não houve efeito significativo da aplicação de Zn no crescimento das plantas dos cultivos individuais (Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3) ou na produção total dos cultivos (Tabela 2.4). A única exceção foi observada no segundo cultivo (soja), no solo argiloso, em que foi observado resposta linear da aplicação de ZnSO₄, ($y = 12.45 + 0,5102 \cdot x$; $R^2 = 0,80$).

Os efeitos de fontes e doses de Zn foram observados nos teores e acúmulo de Zn pelas plantas. Maiores teores foliares e acúmulo de Zn no milho, soja e milho foram observados com aplicação de ZnSO_4 em comparação as fontes contendo ZnO (Tabelas 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4). O acúmulo de Zn pelas plantas dos três cultivos aumentou linearmente com a dose de ZnSO_4 aplicada (Figuras 2.1 e 2.2). Por outro lado, quando a fonte foi ZnO ou ES-Zn, efeitos significativos da dose de Zn foram observados apenas no terceiro cultivo (milheto), (Figura 2.1), influenciando também o acúmulo total de Zn (Figura 2.2). O ZnO ou ES-Zn apresentam efeitos similares em termos de absorção de Zn pelas plantas (Tabelas 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4).

A taxa de recuperação de Zn (TR) pelos cultivos foi afetada pelos diferentes fertilizantes, de forma diferenciada nos cultivos (Tabelas 2.1, 2.2 e 2.3). Corroborando com o conteúdo, como esperado, a TR de Zn pelo cultivo milho (Tabela 2.1) e total dos cultivos (Tabela 4), foi maior para o ZnSO_4 , não havendo diferenças entre as fontes ZnO e ES-Zn. Já nos cultivos de soja e milho (Tabelas 2.2 e 2.3), os mesmos efeitos foram observados apenas em solo arenoso (Tabela 2.3). Na média a TR apresentou-se na faixa de 5% para cada cultivo e 2,4 vezes maior quando a fonte utilizada foi o ZnSO_4 . O tipo de solo afetou a TR de Zn apenas no cultivo de milho (Tabela 2.3), sendo 1,2 vezes maior no solo arenoso.

O solo arenoso em geral, apresentou aumento no conteúdo de zinco independente da fonte (Figuras 2.1 e 2.2).

Observou-se efeitos de doses de Zn, das diferentes fontes, no acúmulo do nutriente pelas plantas. Em solo argiloso, o aumento do conteúdo de Zn como função do aumento das doses do elemento foi linear para as fontes ES-Zn e ZnSO_4 , com inclinações das retas similares. Já para o ZnO, no mesmo solo, o modelo raiz quadrada melhor se ajustou, indicando basicamente ter havido resposta apenas até a dose $1,5 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn. Em solo arenoso, houve aumento linear do conteúdo de Zn com as doses do nutrientes, sendo a maior inclinação obtida com o ZnSO_4 , seguido pelo ZnO e ES-Zn (Figuras 2.1 e 2.2).

Tabela 2.1: Produção de matéria seca, teor de Zn, conteúdo de Zn e taxa de recuperação de Zn no milho, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.

Dose (mg dm ⁻³)	Solo argiloso			Solo arenoso		
	ZnSO ₄	ZnO	ES-Zn	ZnSO ₄	ZnO	ES-Zn
Matéria seca de parte aérea (g vaso ⁻¹)						
0	39,79			31,68		
1,5	43,12	41,54	36,53	35,03	33,03	28,87
3	41,90	42,03	38,42	33,78	29,72	32,04
6	43,24	39,09	44,41	33,64	30,12	34,12
Média das doses	42,01	40,61	39,78	33,53	31,13	31,67
Média das fontes	42,75 a	40,89 a	39,78 a	34,15 a	30,96 a	31,68 a
Média de solos	40,87			32,34***		
Teor de Zn (mg kg ⁻¹)						
0	21,73			18,09		
1,5	34,85	23,87	21,39	33,40	20,57	24,86
3	43,64	27,37	25,04	43,82	27,16	26,53
6	76,46	20,69	22,92	88,22	19,53	18,25
Média de fontes	51,65b	23,98 a	23,11 a	55,15 b	22,42 a	23,21 a
Média de solos	31,79			32,04 ^{ns}		
Conteúdo de Zn (mg vaso ⁻¹)						
0	0,82			0,58		
1,5	1,50	0,99	0,79	1,16	0,68	0,73
3	1,82	1,15	1,01	1,47	0,81	0,86
6	3,27	0,82	1,05	2,91	0,59	0,63
Média de fontes	2,19 b	0,99 a	0,95 a	1,85 b	0,70 a	0,74 a
Média de solos	1,32			1,05***		
Taxa de Recuperação de Zn (%)						
1,5	11,33	1,54	3,47	9,65	2,90	2,47
3	8,36	2,13	3,97	7,41	2,75	2,35
6	10,19	0,64	3,0	9,72	0,22	0,85
Média de fontes	9,96 b	1,44 a	3,48 a	8,93 b	1,95 a	1,89 a
Média de solos	4,96			4,26 ^{ns}		

Tabela 2.2: Produção de matéria seca, teor de Zn, conteúdo de Zn e taxa de recuperação de Zn na soja, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.

Dose (mg dm ⁻³)	Solo argiloso			Solo arenoso		
	ZnSO ₄	ZnO	ES-Zn	ZnSO ₄	ZnO	ES-Zn
Matéria seca de parte aérea (g vaso ⁻¹)						
0	11,89			13,57		
1,5	11,14	12,52	12,49	13,40	14,16	13,20
3	10,77	12,35	12,33	14,82	15,24	15,91
6	12,67	12,65	10,30	15,04	15,43	14,65
Média das doses	11,61*	12,35	11,75	14,02	14,60	14,33
Média das fontes	11,53 a	12,52 a	11,71 a	14,42 a	14,95 a	14,59 a
Média de solos	11,92			14,54***		
Teor de Zn (mg kg ⁻¹)						
0	35,85			30,14		
1,5	68,52	60,71	50,26	59,97	35,41	35,47
3	81,69	61,81	56,71	61,43	43,93	45,02
6	80,22	62,21	54,03	103,20	39,70	36,55
Média de fontes	76,81 b	61,58 a	53,67 a	74,87 b	39,68 a	39,01 a
Média de solos	61,20			49,08**		
Conteúdo de Zn (mg vaso ⁻¹)						
0	0,42			0,36		
1,5	0,75	0,75	0,62	0,83	0,50	0,46
3	0,89	0,76	0,69	0,92	0,67	0,71
6	1,01	0,78	0,57	1,56	0,60	0,53
Média de fontes	0,88 b	0,77 a	0,63 a	1,10 b	0,59 a	0,57 a
Média de solos	0,72			0,72 ^{ns}		
Taxa de Recuperação de Zn (%)						
1,5	5,83	4,38	3,70	4,62	3,04	3,56
3	4,10	2,99	2,41	4,63	2,63	2,95
6	2,54	1,58	1,54	5,0	1,02	0,72
Média de fontes	4,16 a	2,98 a	2,55 a	4,75 b	2,23 a	2,41 a
Média de solos	3,23			3,13 ^{ns}		

Tabela 2.3: Produção de matéria seca, teor de Zn, conteúdo de Zn e taxa de recuperação de Zn no milheto, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.

Dose (mg dm ⁻³)	Solo argiloso			Solo arenoso		
	ZnSO ₄	ZnO	ES-Zn	ZnSO ₄	ZnO	ES-Zn
Matéria seca de parte aérea (g vaso ⁻¹)						
0	21,85			21,20		
1,5	21,29	18,91	20,00	19,08	19,79	18,81
3	19,82	20,48	21,55	19,92	19,76	19,80
6	21,20	18,19	19,84	18,68	20,39	19,97
Média das doses	21,04	19,85	20,81	19,72	20,28	19,95
Média das fontes	20,77 a	19,19 a	20,46 a	19,23 a	19,98 a	19,53 a
Média de solos	20,32			19,75 ^{ns}		
Teor de Zn (mg kg ⁻¹)						
0	72,21			55,91		
1,5	88,44	99,34	88,47	108,21	75,75	71,53
3	114,91	93,98	114,02	136,15	87,35	96,55
6	148,31	100,25	132,18	259,57	91,97	108,38
Média de fontes	117,22 a	97,86 a	111,55 a	167,98 b	85,02 a	92,15 a
Média de solos	105,21			109,14 ^{ns}		
Conteúdo de Zn (mg vaso ⁻¹)						
0	1,34			1,13		
1,5	1,90	2,0	1,81	2,13	1,47	1,36
3	2,29	1,96	2,52	2,73	1,77	2,03
6	3,17	1,80	2,71	4,85	1,92	2,27
Média de fontes	2,46 b	1,92 a	2,35 a	3,24 b	1,72 a	1,89 a
Média de solos	2,15			2,17 ^{ns}		
Taxa de Recuperação de Zn (%)						
1,5	6,19	6,58	6,34	15,55	6,31	5,40
3	7,92	5,98	11,76	13,38	5,41	4,54
6	7,61	3,33	6,47	15,52	3,31	4,76
Média de fontes	7,24 a	5,30 b	8,19 a	14,82 b	5,01 a	4,9 a
Média de solos	6,91			8,24*		

Tabela 2.4: Produção de matéria seca, conteúdo de Zn e taxa de recuperação totais, considerando solos de contrastantes texturas, fontes e doses do elemento.

Dose (mg dm ⁻³)	Solo argiloso			Solo arenoso		
	ZnSO ₄	ZnO	ES-Zn	ZnSO ₄	ZnO	ES-Zn
Matéria seca de parte aérea (g)						
0	72,2			67,81		
1,5	75,57	73,03	69,02	67,53	67,00	60,90
3	72,50	74,87	72,31	68,53	64,74	67,77
6	77,12	69,94	74,55	67,38	65,95	68,76
Média das doses	74,34	72,51	72,02	67,81	66,37	66,31
Média das fontes	75,06 a	72,61 a	71,96 a	67,81 a	65,90 a	65,81 a
Média de solos	73,11			66,64***		
Conteúdo de Zn (g)						
0	2,58			2,07		
1,5	4,16	3,75	3,22	4,13	2,67	2,56
3	5,02	3,88	4,23	5,13	3,28	3,62
6	7,46	3,40	4,35	9,34	3,12	3,45
Média de fontes	5,54 b	3,67 a	3,93 a	6,19 b	3,02 a	3,20 a
Média de solos	4,20			3,93 ^{ns}		
Taxa de Recuperação de Zn (%)						
1,5	23,37	12,51	13,53	29,83	12,26	11,44
3	20,39	11,12	18,15	25,44	10,80	9,86
6	20,36	5,56	11,03	30,25	4,56	6,35
Média de fontes	21,37 b	9,73 a	14,24 a	28,51 b	9,21 a	9,21 a
Média de solos	15,11			15,64 ^{ns}		

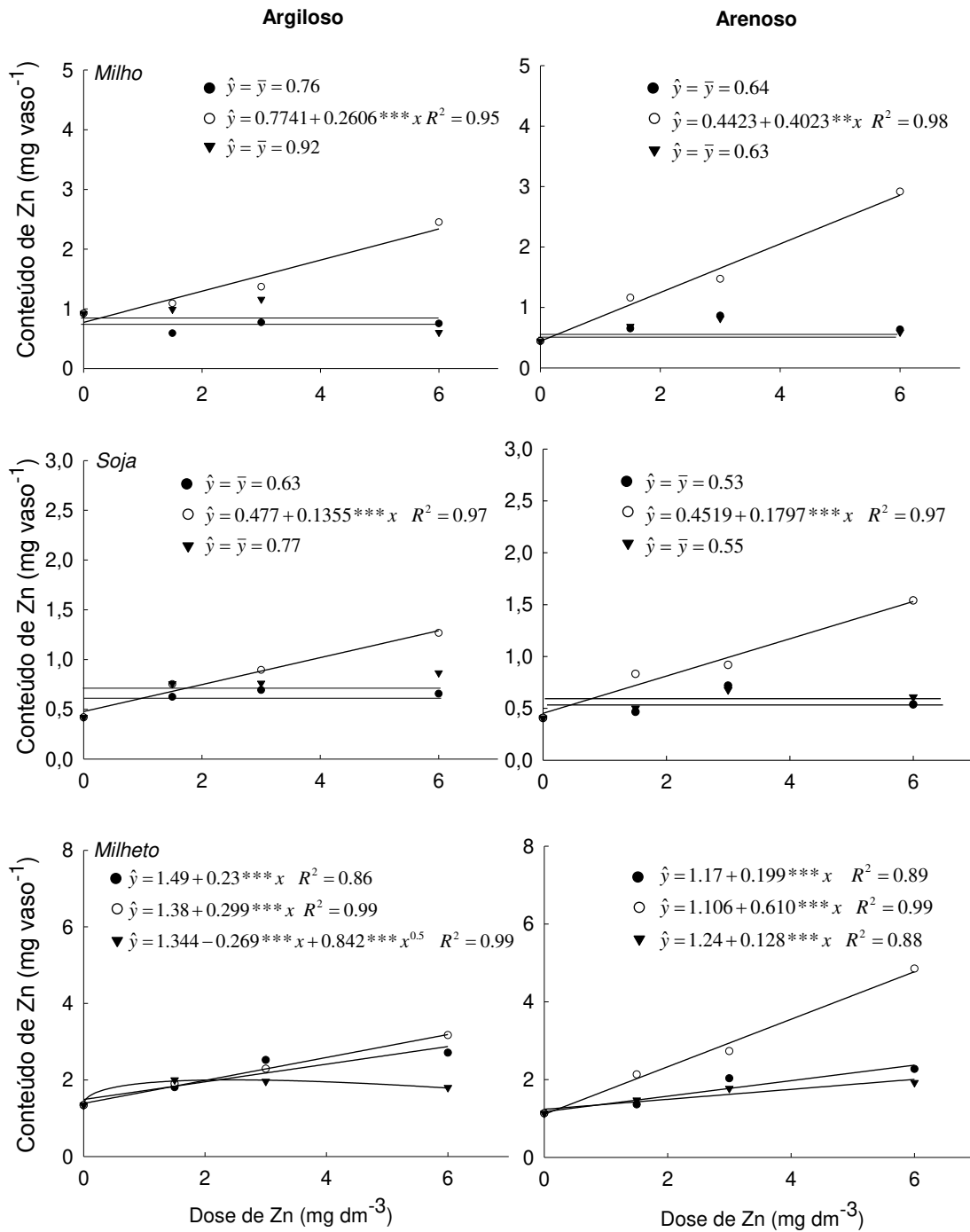


Figura 2.1 Conteúdo de Zn na parte aérea do milho, soja e milheto, em função de doses de Zn, considerando as fontes ES-Zn (●); ZnSO₄ (○) e ZnO (▼), em solos de textura argilosa ou arenosa. O ES-Zn trata-se de um fertilizante co-pastilhado que contém S⁰ (785 g kg⁻¹ de S) e ZnO (50 g kg⁻¹ de Zn).

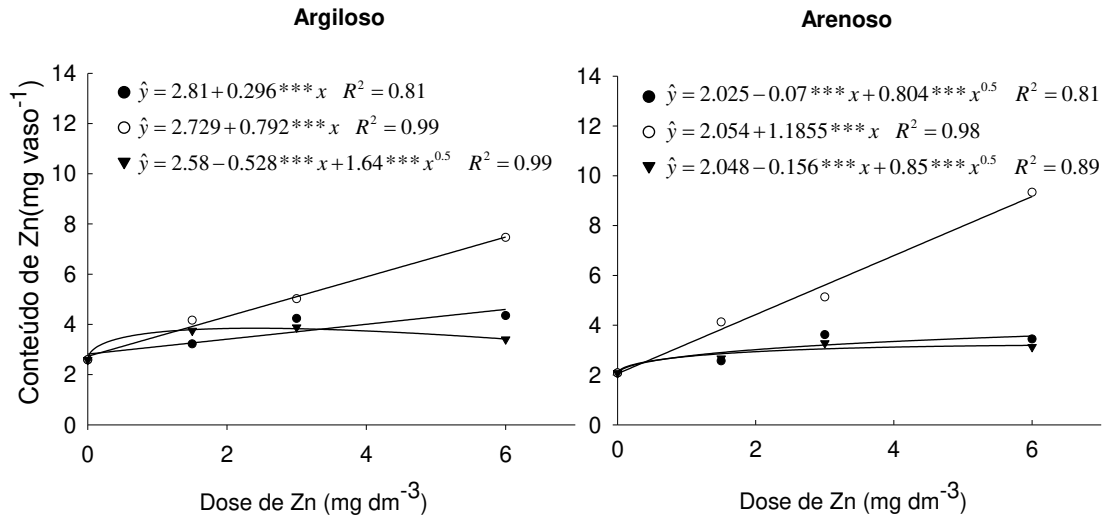


Figura 2.2 Conteúdo total de Zn na parte aérea, em função de doses de Zn aplicado via solo, considerando as fontes ES-Zn (●); ZnSO₄ (○) e ZnO (▼), em solos de textura argilosa e arenosa. O ES-Zn trata-se de um fertilizante co-pastilhado que contém S⁰ (785 g kg⁻¹ de S) e ZnO (50 g kg⁻¹ de Zn).

Eficiência relativa de absorção (%)

Os valores de eficiência relativa de absorção (ERA), considerando a fonte solúvel ZnSO₄ como 100 %, mostram que ao longo do tempo (cultivos), houve um aumento progressivo na ERA para o fertilizante ES-Zn, em ambos os solos (Figura 2.3). No cultivo do milho em solo argiloso a ERA do ES-Zn equivaleu a 95% do ZnSO₄.

A ERA do fertilizante ZnO foi superior ao ES-Zn no cultivo do milho e soja, e inferior no cultivo do milho, em solo argiloso. Já em solo arenoso, a ERA do ES-Zn superou o ZnO no cultivo do milho.

Esse aumento não pôde ser observado no primeiro cultivo mas, numericamente é observado no cultivo do milho e na média total dos cultivos.

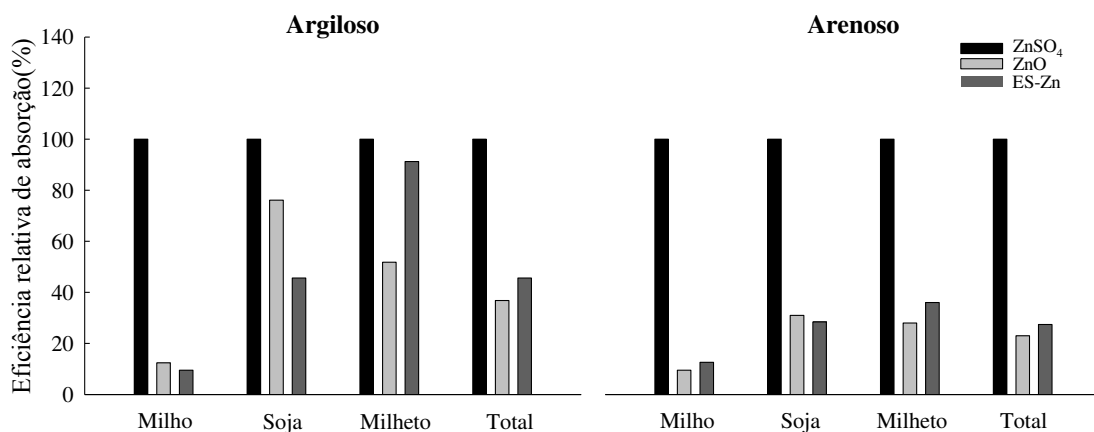


Figura 2.3 Eficiência relativa de absorção de Zn nos cultivos de milho, soja, milheto e total, considerando as fontes ES-Zn, ZnSO₄ e ZnO, em solos de textura argilosa ou arenosa. O ES-Zn trata-se de um fertilizante co-pastilhado que contém S⁰ (785 g kg⁻¹ de S) e ZnO (50 g kg⁻¹ de Zn).

2.4 DISCUSSÃO

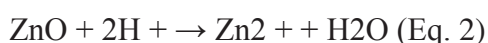
O ZnSO₄ é a principal fonte solúvel de Zn utilizada como fertilizante sólido. Quando aplicado ao solo, dissolve-se rapidamente aumentando a concentração do nutriente na solução do solo e dessa forma, corrige a curto prazo as deficiências de Zn. Ao contrário, fontes de baixa solubilidade em água como o ZnO e ES-Zn, necessitam de acidez (H⁺) e mais tempo para dissolução, sendo portanto menos eficazes a curto prazo.

As maiores respostas no acúmulo de Zn quando a fonte utilizada foi o ZnSO₄ também foram observadas na cultura do arroz por (Shivay et al. 2008), o Zn solúvel em água, pode ser facilmente absorvido pela raiz desta cultura devido à sua difusão. Fato este relatado por (Giordano & Mortvedt., 1972), que observou após 4 semanas a movimentação de Zn de 20 e de 5 mm para o ZnSO₄ e ZnO, respectivamente.

O Zn, devido à sua baixa concentração natural no solo e suas interações com a fração mineral e orgânica, torna-se limitante para grande parte das culturas. Os maiores conteúdos encontrados no solo de textura arenosa, podem ser devido à adsorção nas partículas de argila goethita, ficando parte do Zn imobilizada ou complexada na matéria orgânica do solo (Araújo & Silva, 2012). Também pode estar relacionada à presença de Zn mais disponível devido à formação de complexos solúveis de zinco que são móveis e provavelmente capazes de serem absorvidos pelas raízes (Alloway, 2004). Essas interações são dependentes de CTC, pH, teor

de matéria orgânica e mineralogia do solo, ocorrendo maior adsorção em solos argilosos e menor em arenosos (Oliveira et al., 1999; Rosolem & Franco 2000).

O fertilizante ES-Zn ao sofrer oxidação, leva a uma redução no pH do solo por ser composto por enxofre elementar (S⁰) enriquecido com Zn co-granulado (Mattiello et al. 2017), e indica que o S⁰ foi oxidado no solo (Santos et al., 2017). De fato, muitos microrganismos nativos do solo são oxidantes de enxofre, incluindo bactérias quimiotróficas e heterotróficas e espécies de fungos (Kumar et al., 2018; Luo et al., 2013). Como demonstrado na equação 1, a oxidação do S⁰ pelos microrganismos do solo gera acidez. Portanto, a redução no pH do solo pelo fertilizante ES-Zn foi porque a produção de prótons pela catálise microbiana superou seu consumo para solubilizar o óxido de zinco no fertilizante (Eq. 2).



No entanto, fertilizantes granulares compostos por fontes de nutrientes insolúveis, devido à sua baixa área superficial de reação, promovem retardamento na liberação de nutrientes na solução do solo, afetando a nutrição da planta. Por ser uma tecnologia que contém S⁰ co-pastilhado com ZnO e que necessita sofrer oxidação para liberar de forma gradativa S e Zn para as plantas suprimindo sua necessidade, a longo prazo, torna-se uma fonte interessante devido ao seu efeito residual. Quando comparado ao ZnO, ao se aplicar a fonte insolúvel separadamente, esta acaba apresentando-se menos eficiente no suprimento de Zn às plantas, como foi visto no cultivo do milho.

Apenas o sulfato de zinco foi eficaz como fonte de zinco em termos de crescimento de plantas ou absorção de zinco para os primeiros cultivos, enquanto as respostas para fertilizantes à base de ZnO foram percebidas apenas na terceira safra (milheto). Esse resultado sustenta que, para atender a demanda de zinco por ciclos curtos, os fertilizantes também precisam conter formas de Zn solúveis em água. Mortvedt (1992) mostrou que pelo menos 40% do total de zinco em fertilizantes granulares deveria ser solúvel em água para ser totalmente eficaz para as culturas. Nesse sentido, um fertilizante de zinco ideal deve conter tanto formas solúveis quanto insolúveis para atender às demandas imediatas e futuras da planta, promovendo uma liberação equilibrada de nutrientes ao longo do tempo.

Apesar da semelhança na resposta das plantas aos fertilizantes ZnO e ES-Zn, este último é vantajoso porque é de forma granular e contém alta concentração de S⁰, que é um nutriente vegetal altamente requerido e apresenta-se geralmente como baixa disponibilidade em solos tropicais. Apesar do melhor desempenho para o sulfato de zinco, este sal apresenta

incompatibilidades físicas e químicas para compostos misturas de fertilizantes sólidos, o que está associado à sua alta solubilidade em água, higroscopicidade, e ser como forma de pó.

A eficiência de uso de fertilizantes é apresentada de cinco formas diferentes na literatura (Fageria & Baligar., 2001; Hay, 2008). Neste trabalho, foi calculada na forma de TR, que representa a eficiência da planta em absorver o nutriente aplicado no solo, indicando quanto do nutriente foi absorvido por unidade aplicada (Craswel & Godwin., 1984). Nossos resultados encontrados para a TR média de Zn nos três cultivos foram o mesmo para o valor médio recomendado para as culturas em geral (Santos et al., 2008). Valores maiores de TR são possíveis quando se trata de fonte solúvel de Zn como visto neste trabalho.

A ERA torna-se um parâmetro importante na comparação entre fontes de fertilizantes principalmente quando se trata de fontes solúveis e insolúveis e suas evoluções ao longo do tempo. A tendência na eficiência do ES-Zn mostra que esta pode ser uma boa alternativa em cultivos sucessivos ou perenes.

A inexistência de resposta para a produção de MS com a aplicação das diferentes fontes de Zn, se deu pelo fato desta não ser uma variável recomendada para avaliar performance agrônômica de fertilizantes contendo Zn, sobretudo em casa de vegetação (Jahiruddin et al., 2001). Diferente disso, Fageria (2002) em seu trabalho, notou rendimento de MS aumentado para o arroz com a aplicação de Zn, o mesmo já observado por Fageria et al., (2002),

Estudos mostram que mais de 90% do Zn presente no solo, não está em forma disponível para as plantas, enquanto que a parte solúvel varia de 0,1 a 2 $\mu\text{g g}^{-1}$ de solo (Gupta et al., 2016). Dessa forma, evidencia a necessidade de adubação com fontes que irão disponibilizar Zn para as plantas, devendo estas serem alocadas de forma mais compatíveis com o tipo de cultura e sistema de produção.

2.5 CONCLUSÃO

Após 252 dias de cultivo sucessivo milho-soja-milheto, a absorção e acúmulo de Zn foi maior quando o ZnSO_4 foi aplicado no plantio do milho. A absorção de Zn pelas plantas foi similar com aplicação de ZnO e ES-Zn e a eficiência relativa de absorção dessas fontes aumenta ao longo do tempo. Existe efeito residual para todas as fontes de Zn, com superioridade para a fonte solúvel no período avaliado.

2.6 REFERÊNCIAS

- Alloway BJ (2008) Zinc in Soils and Crop Nutrition, 2nd edn. Paris
- Cakmak I (2008) Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant Soil* 302:1–17. doi: 10.1007/s11104-007-9466-3
- Casagrande JC, Soares MR, Mouta ER (2008) Zinc adsorption in highly weathered soils. *Pesqui Agropecuária Bras* 43:131–139. doi: 10.1590/S0100-204X2008000100017
- Craswel Z (1984) Nutrient Use in Crop Production. CRC Press
- Fageria N., Baligar V, Clark R. (2002) Micronutrients in Crop Production. *Adv Agron* 77:185–268. doi: 10.1016/S0065-2113(02)77015-6
- Fageria NK (2000) Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. *Rev Bras Eng Agríc E Ambient* 4:390–395. doi: 10.1590/S1415-43662000000300014
- Fageria NK (2002) Influence of micronutrients on dry matter yield and interaction with other nutrients in annual crops. *Pesqui Agropecuária Bras* 37:1765–1772. doi: 10.1590/S0100-204X2002001200013
- Fageria NK, Baligar VC (2001) Lowland Rice Response to Nitrogen Fertilization. *Commun Soil Sci Plant Anal* 32:1405–1429. doi: 10.1081/CSS-100104202
- Fan T-T, Wang Y-J, Li C-B, et al (2016) Effect of Organic Matter on Sorption of Zn on Soil: Elucidation by Wien Effect Measurements and EXAFS Spectroscopy. *Environ Sci Technol* 50:2931–2937. doi: 10.1021/acs.est.5b05281
- Giordano PM, Mortvedt JJ (1972) Rice Response to Zn in Flooded and Nonflooded Soil 1. *Agron J* 64:521–524. doi: 10.2134/agronj1972.00021962006400040033x
- Gupta N, Ram H, Kumar B (2016) Mechanism of Zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. *Rev Environ Sci Biotechnol* 15:89–109. doi: 10.1007/s11157-016-9390-1
- Hay RKM (2008) Growth and Mineral Nutrition of Field Crops. By N. K. FAGERIA, V. C. BALIGER and C. A. JONES. 23×15 cm. Pp. xi+624 with 173 text-figures. New York: Marcel Dekker Inc.: 2nd Edition, 1997. Price h/b: \$195.00, ISBN 0 8247 0089 9.: Reviews. *New Phytol* 138:743–750. doi: 10.1111/j.1469-8137.1998.00149.x
- Jahiruddin M, Harada H, Hatanaka T, Sunaga Y (2001) Adding boron and zinc to soil for improvement of fodder value of soybean and corn. *Commun Soil Sci Plant Anal* 32:2943–2951. doi: 10.1081/CSS-120000973
- Jamami N, Büll LT, Corrêa JC, Rodrigues JD (2008) Resposta da cultura do milho (*Zea mays* L.) à aplicação de boro e zinco no solo - DOI: 10.4025/actasciagron.v28i1.1683. *Acta Sci Agron* 28:99–105. doi: 10.4025/actasciagron.v28i1.1683

- Mattiello EM, da Silva RC, Degryse F, et al (2017) Sulfur and Zinc Availability from Co-granulated Zn-Enriched Elemental Sulfur Fertilizers. *J Agric Food Chem* 65:1108–1115. doi: 10.1021/acs.jafc.6b04586
- Santos FC dos, Neves JCL, Novais RF, et al (2008) Modeling lime and fertilizer recommendations for soybean. *Rev Bras Ciênc Solo* 32:1661–1674. doi: 10.1590/S0100-06832008000400031
- Santos et al., (2017) Production and evaluation of a co-granulated elemental sulfur-micronutrient fertilizer. In: *Int. Netw. Nat. Sci. - Res.*
- <http://www.innspub.net/ijaar/production-evaluation-co-granulated-elemental-sulfur-micronutrient-fertilizer/>. Accessed 16 Feb 2018
- Shivay YS, Kumar D, Prasad R, Ahlawat IPS (2008) Relative yield and zinc uptake by rice from zinc sulphate and zinc oxide coatings onto urea. *Nutr Cycl Agroecosystems* 80:181–188. doi: 10.1007/s10705-007-9131-5
- Mortvedt, J.J. Crop response to level of water-soluble zinc in granular zinc fertilizers. *Fert. Res.*, 33:249-255, 1992
- Pauletti, V. Disponibilidade e resposta de culturas a micronutrientes no sistema plantio direto. *Revista Plantio Direto*. Castro: Fundação Cargill, Fundação ABC, p. 71- 95, 1999.
- Kumar, U., Panneerselvam, P., Gupta, V. V., Manjunath, M., Priyadarshinee, P., Sahoo, A., Dash, S. R., Kaviraj, M., and Annapurna, K. (2018). Diversity of Sulfur-Oxidizing and Sulfur-Reducing Microbes in Diverse Ecosystems. In "Advances in Soil Microbiology: Recent Trends and Future Prospects", pp. 65-89. Springer
- Luo, J., Tian, G., and Lin, W. (2013). Enrichment, isolation and identification of sulfur-oxidizing bacteria from sulfide removing bioreactor. *Journal of environmental sciences* 25, 1393-1399.