

GEOVANI DO CARMO COPATI DA SILVA

**BIOFORTIFICAÇÃO DE SOJA COM ZINCO**

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  
2017

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

T

S586p  
2017

Silva, Geovani do Carmo Copati da, 1991-  
Biofortificação de Soja com zinco / Geovani do Carmo  
Copati da Silva. – Viçosa, MG, 2017.  
viii, 22f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Leonardus Vergütz.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f.17-22.

1. *Glycine max*. 2. Soja. 3. Zinco. 4. Solos - Adubos e  
fertilizantes. 5. Plantas - Nutrição. I. Universidade Federal de  
Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-graduação em  
Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 633.34

GEOVANI DO CARMO COPATI DA SILVA

**BIOFORTIFICAÇÃO DE SOJA COM ZINCO**

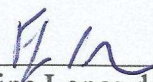
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADO: 23 de fevereiro de 2017.



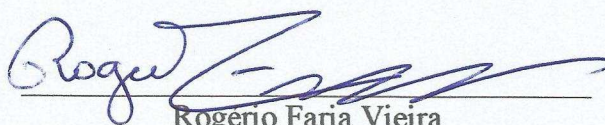
---

Edson Marcio Mattiello  
(Coorientador)



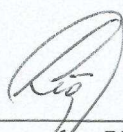
---

Felipe Lopes da Silva



---

Rogério Faria Vieira



---

Leonardus Vergütz  
(Orientador)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, autor de toda obra, Alfa e Ômega, luz do meu caminho.

Aos meus pais, Valter e Adair por todo amor e carinho, pela confiança e pelas orações.

Aos meus irmãos Luciano e Marcela, meus fiéis parceiros de caminhada.

Ao pequeno Arthur por reavivar a alegria em nossas vidas.

À minha amada Mariane, que me fortaleceu e me apoiou nos momentos mais difíceis.

À UFV e ao Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas.

Ao meu Orientador professor Leonardus Vergütz pela orientação, apoio, compreensão e disponibilidade.

Aos meus coorientadores, professores Edson Mattiello e Víctor Hugo pelo apoio e sugestões na escrita da dissertação.

A todos os professores que colaboram na minha formação profissional.

A todos os servidores Técnicos Administrativos do Departamento de Solos, em especial aos companheiros “do outro lado da rua”: Júlio Nunes, João Milagres e Humberto Rosado, aos secretários da pós Carol, Luciana e Nayan e ao Beto e Poliana.

À Thais Cambraia pelas importantes dicas.

Ao Pablo e ao Elton pela ajuda no  $\mu$ EDX.

Aos meus estagiários Vinicio e Guilherme pelo apoio e amizade

Aos amigos de curso, em especial ao Josimar e ao Denison.

Aos amigos de República em especial ao Jefferson, amigo de longa data.

A todos os Viçosenses.

A todos que de alguma forma ajudaram na realização deste trabalho e que a imperfeição humana não me permitiu lembrar: Que Deus os recompense.

## **BIOGRAFIA**

Geovani do Carmo Copati da Silva, filho de Valter Gilson da Silva e Adair da Silva, nasceu no dia 14 de outubro de 1991, na cidade de Barbacena, Estado de Minas Gerais, Brasil.

Em dezembro de 2008, formou-se Técnico em Agropecuária pela Escola Agrotécnica Federal de Barbacena, atual Instituto Federal do Sudeste de Minas *Campus* Barbacena, em Barbacena, Minas Gerais.

Em fevereiro de 2009, ingressou no curso de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais, graduando-se Engenheiro Agrônomo em março de 2014.

Ingressou no programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Solos e Nutrição de Plantas da UFV, em março de 2015, submetendo-se a defesa da dissertação em fevereiro de 2017.

## SUMÁRIO

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| RESUMO.....                                                                 | v   |
| ABSTRACT.....                                                               | vii |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                         | 1   |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS .....                                                 | 3   |
| 2.1 Fase de enriquecimento dos grãos/sementes.....                          | 3   |
| 2.2 Avaliação da qualidade fisiológica das sementes enriquecidas .....      | 6   |
| 2.3 Avaliação de produtividade.....                                         | 7   |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                              | 8   |
| 3.1 Fase de enriquecimento.....                                             | 8   |
| 3.1.1 Produção de grãos de soja .....                                       | 8   |
| 3.1.2 Teor de Zn no grão .....                                              | 9   |
| 3.1.3 Efeito da adubação com Zn nos teores dos demais nutrientes .....      | 12  |
| 3.1.4 Localização do Zn nas sementes .....                                  | 13  |
| 3.2 Efeito do enriquecimento com Zn em aspectos produtivos da cultura ..... | 14  |
| 3.2.1 Qualidade fisiológica das sementes enriquecidas com Zn .....          | 14  |
| 3.2.2 Teste de produtividade.....                                           | 15  |
| 4. CONCLUSÕES .....                                                         | 16  |
| 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                          | 17  |



## RESUMO

SILVA, Geovani do Carmo Copati da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2017. **Biofortificação de soja com zinco.** Orientador: Leonardus Vergütz. Coorientadores: Edson Marcio Mattiello e Victor Hugo Alvarez V.

A soja é uma das culturas de maior importância econômica no Brasil e no mundo e contribui fortemente para a economia nacional. A utilização de seus grãos na alimentação humana encontra-se em crescente expansão. Por isso, a biofortificação agrônômica dos grãos de soja pode representar importante ferramenta no combate às carências nutricionais da população, uma vez que visa enriquecer os alimentos por meio do manejo da cultura, em especial da adubação. Além disso, o enriquecimento de sementes com micronutrientes tem aumentado a produtividade das culturas. No entanto, pouco se conhece a respeito do potencial de acúmulo de Zn em grãos de soja, tampouco os efeitos deste enriquecimento na produtividade da cultura. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de biofortificação de grãos de soja com Zn pelo manejo da adubação e os efeitos do enriquecimento na qualidade fisiológica das sementes e na produtividade da cultura. O estudo foi dividido em três etapas: enriquecimento dos grãos/sementes; avaliação da qualidade fisiológica das sementes enriquecidas e avaliação da produtividade das plantas oriundas das sementes enriquecidas com Zn. Todas elas foram conduzidas em casa de vegetação. O solo e o preparo do solo foram comuns na primeira e terceira etapa. Utilizou-se 4 dm<sup>3</sup> de um Latossolo Vermelho-Amarelo da região de Viçosa-MG. A calagem foi feita utilizando uma mistura de CaCO<sub>3</sub> e MgCO<sub>3</sub> e o solo foi umedecido a 80 % da capacidade de campo e incubado por 15 d. As adubações foram realizadas de acordo com Novais et al. (1991). O P e o Zn foram aplicados no volume total do solo no dia do plantio. Os demais macro e micronutrientes foram parcelados em cinco aplicações. Foram cultivadas quatro plântulas da cultivar TMG 1175 RR. A Etapa de enriquecimento das sementes teve oito tratamentos, com três doses de fertilização de Zn no solo (0, 4 e 8 mg dm<sup>-3</sup>) e seis doses foliares de Zn (0, 4, 8, 12, 16 e 24 kg ha<sup>-1</sup>) combinadas com a dose de referência de 4 mg dm<sup>-3</sup> para o solo. Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados com cinco repetições. A adubação foliar de Zn foi realizada no estágio R3 e a fonte de Zn utilizada foi o sulfato de zinco. Determinaram-se os componentes de produtividade e os teores de macro e micronutrientes nos grãos. Foi realizado o mapeamento microquímico das sementes em Espectrometria de microfluorescência de raios X por dispersão de energia (μEDXRF) para determinar a

localização do Zn nas sementes. Na segunda etapa, as sementes com teor de Zn de 35,1 a 68,5 mg kg<sup>-1</sup> foram semeadas em leito de areia e realizou-se a contagem diária do número de plântulas emergidas. Foram determinadas a porcentagem de emergência (EP), o índice de velocidade de emergência de plântulas (IVE), a velocidade de emergência de plântulas (VE) e a massa de plântulas secas (*mMS\_Pl*). O experimento da terceira etapa foi composto por dez tratamentos, constituído por um fatorial 2 x 5: doses de Zn no solo (0 e 4 mg dm<sup>-3</sup>) e teores de Zn nas sementes (35,1; 51,5; 56,8; 62,5 e 68,5 mg kg<sup>-1</sup>). Foram avaliados os componentes de produtividade. A aplicação de doses de Zn no solo e a combinação das aplicações no solo e nas folhas não tiveram efeito sobre a produção. No entanto, estas causaram aumento de 75 e 95 % no teor de Zn nos grãos, respectivamente, em relação ao controle. O teor máximo de Zn nos grãos foi 68,4 mg kg<sup>-1</sup>, obtido com a dose foliar de 22,97 kg ha<sup>-1</sup> combinada com a aplicação de 4 mg dm<sup>-3</sup> no solo. Com exceção do Ca e Mg, o enriquecimento dos grãos com Zn não correlacionou-se significativamente com o teor dos demais macro e micronutrientes nos grãos. O Zn se acumulou preferencialmente no eixo embrionário, mas também houve acúmulo nos cotilédones das sementes ricas em Zn. O teor de Zn nos grãos de soja, na faixa entre 35,1 e 68,5 mg kg<sup>-1</sup>, não teve efeito sobre o vigor das sementes. Analogamente, os componentes da produtividade não foram influenciados pelos teores de Zn nas sementes. Logo, a cultura da soja apresenta potencial para biofortificação dos grãos com Zn. Porém, este enriquecimento, na faixa de teor entre 35,1 e 68,5 mg kg<sup>-1</sup>, não afeta a qualidade fisiológica de sementes e nem a produtividade da cultura em um solo com 0,67 mg dm<sup>-3</sup> de Zn por Mehlich-1.



## ABSTRACT

SILVA, Geovani do Carmo Copati da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2017. **Biofortification of soybean with zinc**. Adviser: Leonardus Vergütz. Co-Advisers: Edson Marcio Mattiello and Victor Hugo Alvarez V.

Economically, soybean is one of the most important crops in the world, including Brazil and contributes heavily to the national economy. The use of its grains in human food has been increasing. Thus, the agronomic biofortification of soybeans can represent an important tool to alleviate the nutritional deficiencies of the population, as it aims to enrich the food through crop management, especially by fertilization. In addition, enrichment of seeds with micronutrients has increased yield crop. However, the potential accumulation of Zn in soybeans and the effects of this enrichment on crop yield are mostly unknown. Therefore, the objective of this research was to evaluate the potential of biofortification of soybean grains with Zn by the management of fertilization, the effects of the enrichment on the physiological quality of the seeds and the productivity of the crop. The research was splitted into three stages: grain / seed enrichment phase; Evaluation of the physiological quality of the enriched seeds and Evaluation of the productivity of the plants harvested from the Zn enriched seeds. All the steps of this research took place in a greenhouse of the Department of Soils - UFV. The Soil and soil preparation were common for both the first and third stages. Four dm<sup>3</sup> of a Red-Yellow Latosol of the region of Viçosa-MG was used. The liming was done using a mixture of CaCO<sub>3</sub> and MgCO<sub>3</sub> and the soil was moistened at 80% field capacity and incubated for 15 d. Fertilizations were performed according to Novais (1991), where P and Zn were applied into the total soil volume on the seeding day. The others macro and micronutrients were spread into five applications. Four seedlings TMG 1175 RR cultivar were grown. The seed enrichment stage had eight treatments, with three doses of Zn fertilization in the soil (0, 4 and 8 mg dm<sup>-3</sup>) and six leaf doses of Zn (0, 4, 8, 12, 16 and 24 kg ha<sup>-1</sup>) combined with the reference dose of 4 mg dm<sup>-3</sup> for the soil. A randomized complete block design with five replications was used. Foliar fertilization of Zn was carried out in stage R3 and the source of Zn used was zinc sulfate. The crop yield components and the macro and micronutrients contents in the grains were determined. The microchemical mapping of the seeds in energy dispersion X-ray microfluorescence spectrometry (μEDXRF) was performed to determine the location of the Zn in the seeds. In the second stage, seeds with Zn content varying from 35.10 to 68,52 mg kg<sup>-1</sup> were seeded in sand bed and the daily number of emerged seedlings was counted. The

percentage of emergence (EP), seedling emergence velocity index (IVE), seedling emergence velocity (VE) and dry mass of seedlings (*mMS\_Pl*) were determined. The experiment of the third stage consisted of ten treatments, consisting of a factorial 2 x 5, two doses of Zn in the soil (0 and 4 mg dm<sup>-3</sup>) and five Zn contents in the seeds (35,10, 51,52 , 56.78, 62.50 and 68.52 mg kg<sup>-1</sup>). The components of crop productivity were evaluated. Data were submitted to analysis of variance, mean test and regression. The application of Zn doses in the soil and the combination of soil and leaf applications had no effect on crop yield. However, the Zn content in the grains increased from 74.7 to 95.0% compared to the control. The maximum content of Zn in the grains was 68.45 mg kg<sup>-1</sup>, obtained from the leaf dose of 27 kg ha<sup>-1</sup>, combined with the application of 4 mg dm<sup>-3</sup> in the soil. The enrichment of the grains with Zn had little or no relation with the content of the other macro and micronutrients in the grains. Zn accumulated preferentially in the embryonic axis, but there was also accumulation in the cotyledons of the most enriched seeds. The Zn content in soybean grains, in the range of 35.1 to 68.5 mg kg<sup>-1</sup>, had no effect on the EP, IVE, VE and *mMS\_Pl* variables. Similarly, the variables that make up the productive aspects of soybean did not show significant variations due to the variation in Zn content in the seeds. Thus, it is verified that the soybean crop presents potential for biofortification of its grains with Zn. However, this enrichment in the range of 35.1 to 68.5 mg kg<sup>-1</sup> did not show significant variations on the physiological seed quality neither on crop yield in a soil with 0.67 mg dm<sup>-3</sup> of Zn per Mehlich-1.

## 1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma das culturas de maior importância econômica no mundo. Na safra de 2015/16, a produção brasileira alcançou 95,5 milhões de toneladas, em uma área plantada de 33,3 milhões de hectares (CONAB, 2016). Essa cultura representa 11 % das receitas provenientes das exportações brasileiras, o que contribui para a geração de emprego e renda no país (ALICEWEB, 2016).

O centro de origem da soja é o continente asiático, onde está presente no cardápio dos habitantes há milhares de anos. No mundo ocidental, o uso do grão sempre esteve associado à alimentação animal, por meio da sua utilização na fabricação de rações (QUI; CHANG, 2010). No entanto, a utilização na alimentação humana está em crescente expansão, por ser rica em energia, lipídeos e proteínas, além de ser um alimento funcional (CARRAO-PANIZZI et al., 1998). Por isso, seu consumo pode ser uma estratégia para suprir as carências nutricionais que afligem a população de diferentes países do mundo.

Problemas com deficiências nutricionais atingem quase metade da população mundial e um terço desta população pode ter deficiência de Zn. A deficiência de Zn nos seres humanos afeta o crescimento, o sistema imunológico e a capacidade de aprendizagem, podendo causar a morte, principalmente de fetos e crianças (HOTZ; BROWN, 2004; BLACK et al., 2008).

A deficiência de Zn nos seres humanos está associada ao cultivo de alimentos em solos pobres nesse elemento, condição que resulta em alimentos com baixos teores de Zn (ALLOWAY, 2004). O cerrado brasileiro, onde a soja é largamente cultivada, apresenta baixa fertilidade natural de Zn, o que pode comprometer a produtividade da cultura e a disponibilidade deste nutriente na alimentação humana (LOPES, 1984).

Além da baixa disponibilidade natural de Zn, fatores como os cultivos sucessivos e de alta produtividade sem a reposição de nutrientes, a redução do teor de matéria orgânica e a calagem excessiva podem agravar a ocorrência de deficiência deste micronutriente nas plantas (LINDSAY, 1991; MARTENS; WESTERMANN, 1991; MARSCHNER, 1993; CAKMAK, 2002).

Para aumentar a disponibilidade de Zn para seres humanos, têm-se adotado algumas estratégias para aumentar o teor deste micronutriente nos órgãos comestíveis de alimentos básicos (CAKMAK, 2008). Uma destas estratégias é a biofortificação agrônômica, que tem como objetivo enriquecer os alimentos por meio do manejo da adubação (YILMAZ et al., 1998; WISSUWA et al., 2008; CAKMAK, 2010; HUSSAIN

et al., 2012). A biofortificação agronômica de alimentos pode ser alcançada com a fertilização do solo e/ou foliar. A combinação dessas adubações tem se mostrado mais eficiente para aumentar o teor de Zn nos grãos de cereais (YILMAZ et al., 1998; CAKMAK et al., 2009; HUSSAIN et al., 2012) e feijão (CAMBRAIA, 2015).

Além dos benefícios na nutrição humana, a biofortificação agronômica com Zn pode aumentar a produtividade das culturas (YILMAZ et al., 1998; SLATON et al., 2001), uma vez que esse elemento atua em processos relevantes na regulação fisiológica e nutricional da planta, o qual é ativador ou componente estrutural de enzimas. Ademais, é essencial para a síntese de triptofano, aminoácido precursor do ácido indol acético (hormônio vegetal de crescimento), além de participar do metabolismo do nitrogênio e ser necessário para manutenção da integridade das biomembranas (MALAVOLTA, 2006).

Assim como os seres humanos, os animais também demandam Zn para o seu crescimento, desenvolvimento e fortalecimento do sistema imunológico, o que demanda suplementação mineral dos rebanhos, principalmente nos sistemas de confinamento (MILLER, 1970; GOSELINK; JONGBLOED, 2012). A utilização de soja enriquecida com Zn na fabricação de rações para alimentação animal pode aumentar a disponibilidade deste mineral aos animais, o que beneficia toda a cadeia de produção de proteína animal.

A biofortificação agronômica da soja pode ser benéfica para toda a cadeia produtiva que a envolve, pois, esta prática pode acarretar aumento na produtividade média da cultura em solos naturalmente pobres, revertendo o atual quadro de estagnação na produtividade dos últimos 10 anos (CESB, 2016). Adicionalmente, o produtor de grãos se beneficiará por conseguir agregar valor ao produto final e o consumidor se beneficiará ao adquirir um produto com maior conteúdo de Zn.

Poucos trabalhos incluem a cultura da soja na estratégia de biofortificação de alimentos com Zn. O estudo pioneiro de Inocencio (2014) evidencia que grãos de soja podem ser biofortificados com Zn pelo manejo da adubação no solo. No entanto, o autor não avaliou o potencial da adubação foliar e tampouco o efeito deste enriquecimento na qualidade fisiológica das sementes e na produtividade da cultura. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação combinada de Zn no solo e foliar na biofortificação dos grãos de soja com Zn e o efeito das sementes enriquecidas com Zn na qualidade fisiológica das sementes e na produtividade da cultura.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados três experimentos conduzidos em casa de vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa – UFV. Os experimentos foram feitos em três etapas: 1) fase de enriquecimento dos grãos/sementes; 2) avaliação da qualidade fisiológica das sementes enriquecidas e 3) avaliação da produtividade das plantas oriundas das sementes enriquecidas com Zn.

### 2.1 Fase de enriquecimento dos grãos/sementes

Foi utilizado um Latossolo Vermelho-Amarelo (Quadro 1), o qual foi seco ao ar e passado em peneira de 2 mm de diâmetro (TFSA). O solo foi analisado quimicamente (análise de rotina) e determinados os teores disponíveis de macro e micronutrientes, assim como os componentes da acidez do solo e fósforo remanescente (P-rem). A necessidade de calagem foi determinada pelo método de neutralização do alumínio e elevação dos teores de cálcio e magnésio, segundo Alvarez et al. (1999).

O calcário utilizado foi uma mistura de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ , com relação molar Ca:Mg de 4:1. A aplicação do calcário foi realizada por unidade experimental para facilitar sua mistura com o solo. Após a aplicação do calcário, o solo foi irrigado para elevar a umidade do solo à capacidade de campo e incubado por 15 d. Durante o período de incubação realizou-se a correção da umidade, quando necessário. Em seguida, o solo foi seco novamente e passado em peneira de malha de 4,0 mm para promover o destorroamento.

**Quadro 1.** Características químicas e físicas do solo.

| pH <sup>(1)</sup> | P <sup>(2)</sup>       | K <sup>(2)</sup> | Ca <sup>2+</sup> <sup>(3)</sup> | Mg <sup>2+</sup> <sup>(3)</sup> | Al <sup>3+</sup> <sup>(3)</sup>    | (H+Al) <sup>(4)</sup> | SB <sup>(5)</sup> | P-Rem <sup>(6)</sup> | Zn <sup>(2)</sup>   | MO <sup>(7)</sup>  | Arg. <sup>(8)</sup> | E.U. <sup>(9)</sup> |
|-------------------|------------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
|                   | -mg dm <sup>-3</sup> - |                  |                                 |                                 | ----- cmolc dm <sup>-3</sup> ----- |                       |                   | mg L <sup>-1</sup>   | mg dm <sup>-3</sup> | g kg <sup>-1</sup> | %                   | g kg <sup>-1</sup>  |
| 5,58              | 1,7                    | 8,0              | 0,54                            | 0,15                            | 0,00                               | 2,30                  | 0,71              | 9,80                 | 0,67                | 10,4               | 57                  | 330                 |

<sup>(1)</sup>pH em H<sub>2</sub>O; <sup>(2)</sup>P, K e Zn: extrator Mehlich-1 <sup>(3)</sup>; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e AL<sup>3+</sup>: extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup> <sup>(4)</sup>; (H+Al): extrator acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup>, <sup>(5)</sup> Soma de Bases Trocáveis, <sup>(6)</sup> P-rem: fósforo remanescente (ALVAREZ et al., 2000), <sup>(7)</sup> Matéria orgânica: C. org. x 1,724 (Walkley-Black), <sup>(8)</sup>Argila (RUIZ, 2005), <sup>(9)</sup> E.U. Equivalente de Umidade.

As adubações de plantio foram realizadas de acordo com Novais et al. (1991). As doses de macro e micronutrientes aplicadas ao longo do experimento foram: 300 mg dm<sup>-3</sup> de P, 150 mg dm<sup>-3</sup> de K, 0,81 mg dm<sup>-3</sup> de B, 1,33 mg dm<sup>-3</sup> de Cu, 1,55 mg dm<sup>-3</sup> de Fe, 3,66 mg dm<sup>-3</sup> de Mn e 0,15 mg dm<sup>-3</sup> de Mo. A quantidade recomendada de S foi aumentada de 40 mg dm<sup>-3</sup> para 80 mg dm<sup>-3</sup>.

A dose integral de P e as doses de Zn, de acordo com cada tratamento, foram aplicadas no volume total do solo de cada vaso no dia do plantio. Os demais macro e micronutrientes foram aplicados de forma parcelada em 4 aplicações aos 10, 20, 30 e 40 d após o plantio. O solo foi irrigado periodicamente com água destilada a fim de manter a umidade próxima da capacidade de campo. A cultivar de soja foi a TMG 1175 RR.

Esse primeiro experimento foi constituído por oito tratamentos e tinha por objetivo não apenas enriquecer os grãos de soja com Zn, mas produzir sementes com concentrações crescentes de Zn, que pudessem ser avaliadas, posteriormente, quanto à produtividade. A escolha desses tratamentos baseou-se no trabalho de Cambraia, (2015) com o feijão e foi feita para se conseguir uma curva de concentração de Zn na semente. Os tratamentos foram a combinação de três doses de Zn no solo (0, 4 e 8 mg dm<sup>-3</sup>) e seis doses foliares de Zn (0, 52, 103, 154, 206 e 309 mg/vaso) que equivalem, respectivamente, à 0, 4, 8, 12, 16 e 24 kg ha<sup>-1</sup>, considerando um estande de 311 000 plantas/ha. Essas doses de Zn aplicadas via foliar foram realizadas apenas com a dose de 4 mg dm<sup>-3</sup> de Zn no solo (Quadro 2).

A fonte de Zn utilizada foi o ZnSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O, que foi diluído em água para aplicação tanto na folhagem quanto no solo. A aplicação foliar foi realizada no início do desenvolvimento das vagens, estágio R3 (FEHR; CAVINESS, 1977) da cultura. Foram aplicados 30 mL de solução por vaso, sendo este o necessário para o molhamento completo das plantas, sem que ocorresse o escoamento da solução.



**Quadro 2.** Tratamentos da etapa de enriquecimento.

| Tratamentos | Dose de Zn no solo (mg dm <sup>-3</sup> ) | Dose foliar de Zn (kg ha <sup>-1</sup> ) |
|-------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1           | 0                                         | 0                                        |
| 2           | 4                                         | 0                                        |
| 3           | 8                                         | 0                                        |
| 4           | 4                                         | 4                                        |
| 5           | 4                                         | 8                                        |
| 6           | 4                                         | 12                                       |
| 7           | 4                                         | 16                                       |
| 8           | 4                                         | 24                                       |

Foram semeadas 10 sementes por vaso a uma profundidade de 2 cm. Após a emergência das plantas, no estágio V1, foi realizado o desbaste, deixando quatro plantas homogêneas quanto ao padrão de crescimento. A unidade experimental foi composta por um vaso contendo 4 dm<sup>3</sup> de solo e quatro plantas de soja. Foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados, com cinco repetições.

O experimento foi encerrado após a senescência das plantas. As vagens foram coletadas e as sementes foram separadas para as análises químicas e avaliação de produtividade. Por fim, as plantas foram cortadas rente ao solo. Foram determinadas a massa de 100 grãos (*mCG*) e a massa de matéria seca de grãos por vaso (*mMS\_V*).

A *mMS\_V* foi obtida após a secagem das sementes em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C por 72 horas. O material seco foi triturado em moinho tipo Wiley, passado em peneira de 1 mm e posteriormente armazenando em recipientes de vidro vedados até a realização das análises.

As sementes, após secas e moídas, foram analisadas quimicamente para a determinação dos teores totais dos macro e micronutrientes nas sementes. Para a determinação do teor de N, foi realizada a digestão sulfúrica e para os demais elementos digestão nitro-perclórica. O P foi dosado por colorimetria, o K por Espectrometria de Emissão de Chama e os nutrientes Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e Zn, por Espectrometria de Absorção Atômica (EMBRAPA, 2000).

Para determinar a localização do Zn nas sementes, foi realizado o mapeamento químico das sementes em Espectrometria de microfluorescência de raios X por dispersão de energia ( $\mu$ EDXRF).

Os dados de  $mCG$ ,  $mMS\_V$  e teor de Zn nos grãos/semes (  $tZn\_S$  ) foram submetidos à análise de variância. Também foram determinadas as taxas de recuperação de Zn pelos grãos em função das doses de Zn aplicadas no solo e foliar. Para isto, determinou-se primeiramente, para cada dose adicionada, o conteúdo de Zn na matéria seca de grãos (  $cZn\_G$  ), o qual foi obtido pelo produto entre o  $tZn\_S$  e a  $mMS\_V$ , sendo expresso em  $mg\ vaso^{-1}$ . Do valor encontrado, foi subtraído o  $cZn\_G$  obtidos nos tratamentos controles, ou seja, aqueles que não receberam adubação com Zn no solo ou foliar. Este resultado foi dividido pela dose de Zn adicionada via solo ou foliar, expressa em  $mg\ vaso^{-1}$ , sendo este a taxa de recuperação de Zn pelos grãos, a qual foi expresso em porcentagem.

Para avaliar os efeitos das doses de Zn adicionadas ao solo, foi feito um teste de média Tukey. Para avaliar os efeitos das doses foliares de Zn sobre as variáveis, foi feita análise de regressão e equações matemáticas foram ajustadas. Para avaliar o efeito do enriquecimento em Zn nos teores dos demais macro e micronutrientes no grão, foi feita uma matriz de correlação linear.

## **2.2 Avaliação da qualidade fisiológica das sementes enriquecidas**

Para a avaliação da qualidade fisiológica das sementes, foi conduzido ensaio em casa de vegetação em que as sementes enriquecidas na etapa anterior foram semeadas em bandejas plásticas com areia lavada, esterilizada e umedecida com água destilada até atingir 60 % da capacidade máxima de retenção.

O experimento foi constituído por cinco tratamentos, formados por sementes com diferentes teores de Zn, produzidas nos tratamentos 1, 2, 4, 5 e 8 da etapa anterior. As médias do teor de Zn nas sementes dos tratamentos são: T1: 35,10; T2: 51,52; T3: 56,78; T4: 62,50 e T5: 68,52  $mg\ kg^{-1}$ , os quais apresentam os seguintes desvios padrão, respectivamente, 5,22; 1,42; 2,30; 2,33 e 2,95  $mg\ kg^{-1}$ . O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com cinco repetições.

Foram distribuídas 50 sementes por bandeja, em sulcos longitudinais de 2 cm de profundidade distanciados entre si de 5 cm. Foram realizadas irrigações diárias, para manter a umidade ao nível de 80 % da capacidade de campo. Realizaram-se contagens diárias, registrando-se o número de plântulas com cotilédones expostos acima do nível do solo, até a estabilização das contagens, para obtenção da emergência de plântulas (EP).

Simultaneamente ao teste de EP, também foram calculados o índice de velocidade de emergência de plântulas (IVE) e a velocidade de emergência de plântulas (VE), de

acordo com o método proposto por Maguire (1962). As contagens foram realizadas diariamente a partir do dia em que surgiram as primeiras plântulas emergidas até a estabilização das contagens. O IVE foi expresso em número de plântulas germinadas por dia (plântulas  $d^{-1}$ ) e o VE em número de dias necessários para a estabilização da germinação (d).

Posteriormente à estabilização da emergência das plântulas, as mesmas foram colhidas, executando a lavagem das raízes para eliminar o excesso de areia e secas em estufa de circulação forçada por 72 horas à temperatura de 65 °C para determinar a massa de plântulas seca ( $mMS\_PI$ ).

Os dados de EP, IVE, VE e  $mMS\_PI$ , foram submetidos à análise de variância. Para avaliar o efeito do  $tZn\_S$  sobre as variáveis EP, IVE, VE e  $mMS\_PI$ , foi feita análise de regressão, para estimar o teor de Zn nas sementes que proporcionam maior viabilidade e vigor das sementes.

### 2.3 Avaliação de produtividade

Para avaliar o efeito do enriquecimento das sementes com Zn na produtividade de plantas oriundas destas, as sementes (de teor conhecido de Zn) enriquecidas na primeira etapa foram plantadas no mesmo solo utilizado na etapa de enriquecimento (Quadro 1). O preparo do solo, as adubações e a condução do experimento foram semelhantes aos realizados na primeira etapa.

Foram semeadas 10 sementes por vaso (coletadas nos tratamentos 1, 2, 4, 5 e 8 do experimento I e padronizadas quanto ao tamanho por meio de peneiras) a uma profundidade de 2 cm. Após a emergência das plantas, no estágio V1, foi realizado o desbaste, para quatro plantas homogêneas quanto ao crescimento, que foram conduzidas até a colheita dos grãos. Foram determinados o número médio de grãos por vagem ( $nG\_Vg$ ), o número de vagens por vaso ( $nVg\_V$ ), a massa de 100 grãos ( $mCG$ ) e a massa de matéria seca de grãos por vaso ( $mMS\_V$ ).

Os tratamentos foram arranjos no esquema fatorial 2 x 5: doses de Zn no solo (0 e 4  $mg\ dm^{-3}$ ) e teor de Zn nas sementes (35,10; 51,52; 56,78; 62,50 e 68,52  $mg\ kg^{-1}$ ), com desvio padrão de 5,22; 1,42; 2,30; 2,33; 2,95, respectivamente. A unidade experimental foi composta por vasos com 5  $dm^3$  de solo com quatro plantas de soja, dispostas em delineamento em blocos casualizados, com cinco repetições.

Para avaliar o efeito do  $tZn\_S$  sobre as variáveis,  $nG\_V$ ,  $nV\_P$ ,  $mCG$ ,  $mMS\_V$  nas doses de 0 e 4  $mg\ dm^3$  aplicadas no solo, foi feita análise de regressão.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Fase de enriquecimento

##### 3.1.1 Produção de grãos de soja

As doses de fertilização de Zn no solo (0, 4 e 8 mg dm<sup>-3</sup>) não influenciaram significativamente a *mCG* e *mMS\_V*, e as médias para estas variáveis foram, respectivamente, 13,3 g e 44,5 g. Esses resultados indicam que o teor de 0,67 mg dm<sup>-3</sup> pelo extrator Mehlich-1 no solo sem adubação não comprometeu a produção da cultura.

Esperava-se uma resposta positiva no aumento da produção, pois de acordo com as tabelas de interpretação dos resultados da análise de solo utilizadas no Estado de Minas Gerais (ALVAREZ et al., 1999), o teor de Zn foi classificado como baixo. Ademais, segundo Fageria (2000) e Galvão (2004) o nível crítico de Zn em solos argilosos é de 0,8 mg dm<sup>-3</sup> e 1 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente, para o extrator Mehlich-1. Nessa condição de solo, a planta deveria responder a adubação com Zn, uma vez que o nível de Zn disponível é menor que o nível crítico.

Gonçalves Junior et al. (2010) também não verificaram resposta à adubação com doses de 0, 2 e 4 kg ha<sup>-1</sup> de Zn na cultura da soja, em solo com teor de Zn classificado como médio. Por outro lado, em solo com disponibilidade média de Zn, Cambraia (2015) concluiu que a omissão da fertilização de Zn no solo comprometeu a produção de grãos de feijão, enquanto que as doses de 5 e 10 kg ha<sup>-1</sup> elevaram consideravelmente a produtividade da cultura e não diferiram significativamente entre si.

Isso demonstra a necessidade do desenvolvimento de novos extratores com maior poder de predição da real disponibilidade de Zn no solo, bem como para a determinação de níveis críticos variáveis em função do tipo de solo e da cultura a ser cultivada, a fim de que se tenha maior previsibilidade na resposta à adubação com Zn.

Fageria (1984) e Mousavi (2011) indicam que existe um efeito antagônico entre P e Zn, o que diminui a disponibilidade do micronutriente quando altas doses de P são adicionadas ao solo. No entanto, é pouco provável que o antagonismo entre esses nutrientes explique a ausência de respostas ao suprimento de Zn na produção de grãos de soja neste experimento, uma vez que Carneiro et al. (2008) concluiu que o fornecimento de Zn na adubação previne a sua deficiência ocasionada por elevadas doses de P no solo.

Analogamente, a adubação foliar (0, 4, 8, 12, 16 e 24 kg ha<sup>-1</sup>) combinadas com a dose de Zn referência no solo (4 mg dm<sup>-3</sup>) também não influenciou a produção de grãos

da soja. Esses resultados eram esperados devido à aplicação tardia do Zn via foliar, que foi feita no estágio fenológico R3 para maximizar o enriquecimento (ou biofortificação agrônômica) do grão com Zn. Neste estágio, as vagens estão em formação e tem-se o início do enchimento dos grãos, momento propício à translocação do Zn aplicado nas folhas para ser acumulado no órgão comercial (CARVALHO; NAKAGAWA, 2000).

Resultados semelhantes foram encontrados por Cambraia (2015), que verificou que as aplicações foliares nos estádios V5, R7 e R8 não tiveram efeito significativo na produção de grãos do feijoeiro. No trigo, a aplicação foliar tardia também não influenciou a produtividade da cultura (MAO, 2014).

### 3.1.2 Teor de Zn no grão

#### 3.1.2.1 Doses no solo

As doses de Zn aplicadas no solo aumentaram significativamente o teor de Zn nos grãos (Tabelas 1 e 2). As doses de 4 e 8 mg dm<sup>-3</sup> enriqueceram os grãos com Zn em 47 e 75 %, respectivamente, em relação à dose 0, cujo teor de Zn no grão foi de 35,1 mg kg<sup>-1</sup>. Esses resultados indicam que o manejo da adubação pode aumentar o teor de Zn nos grãos de soja.

**Tabela 1.** Quadro de ANOVA dos efeitos de doses de Zn no solo (*d\_Solo*) e doses foliares de Zn dentro da dose referência no solo sobre o teor de Zn nos grãos (*tZn\_G*).

| Fonte de Variação         | Graus de Liberdade | Quadrados médios      |
|---------------------------|--------------------|-----------------------|
|                           |                    | <i>tZn_G</i>          |
| Blocos                    | 4                  | 6,81 <sup>ns</sup>    |
| Tratamentos               | (7)                | 595,82 <sup>**</sup>  |
| <i>d_Solo</i>             | (2)                | 878,22 <sup>**</sup>  |
| Efeito Linear             | 1                  | 1720,03 <sup>**</sup> |
| Efeito Quadrático         | 1                  | 36,41 <sup>*</sup>    |
| <i>d_ foliares// d_sr</i> | 5                  | 217,84 <sup>**</sup>  |
| Resíduo                   | 28                 | 10,97                 |
| Total                     | 39                 | 115,52                |
| CV (%)                    | -                  | 5,68                  |

<sup>ns</sup>, <sup>\*\*</sup>, <sup>\*</sup> não significativo, significativo a 1 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

**Tabela 2.** Teor de Zn nos grãos de soja (tZn\_G) em função de doses de Zn adicionados no solo.

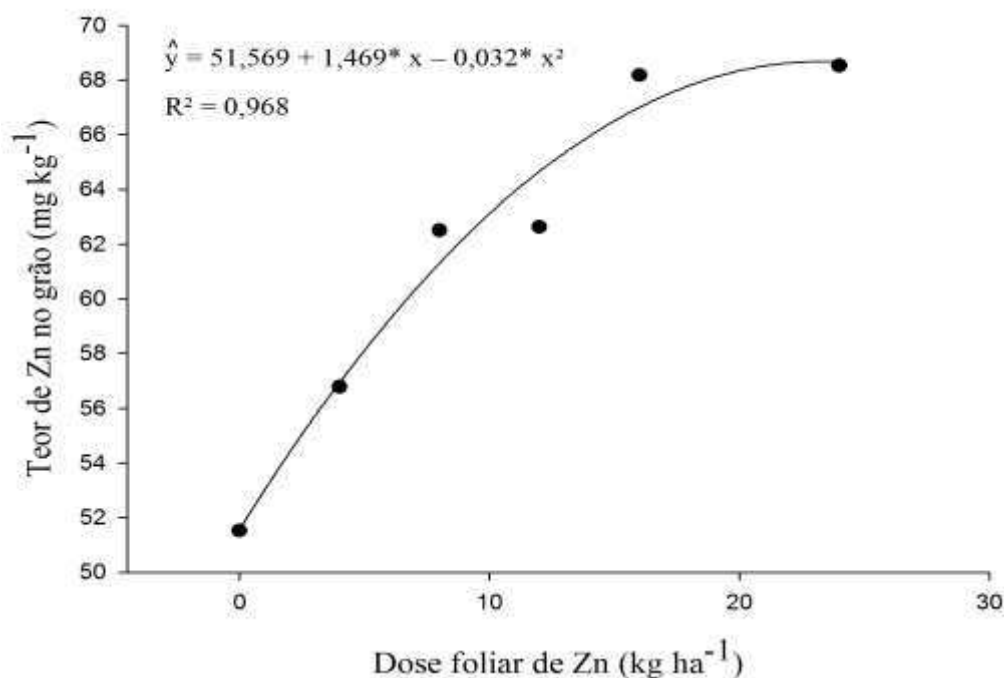
| Dose no Solo<br>(mg dm <sup>-3</sup> ) | tZn_G<br>(mg/kg) |
|----------------------------------------|------------------|
| 0                                      | 35,1 a           |
| 4                                      | 51,5 b           |
| 8                                      | 61,3 c           |

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

No feijão, Cambraia (2015) verificou que as doses de Zn no solo de 5 e 10 kg ha<sup>-1</sup> não diferiram com relação aos teores de Zn nos grãos. O presente estudo indica que a soja é mais responsiva ao aumento das doses de Zn no solo, uma vez que houve diferença significativa entre as doses de 4 e 8 mg dm<sup>-3</sup>, mas há a necessidade de outros estudos para definir a melhor dose de Zn a ser adicionada ao solo para elevar o teor de Zn nos grãos.

### 3.1.2.2 Doses de Zn foliares

A aplicação de doses de Zn via foliar, combinada com a dose referência de Zn no solo (4 mg dm<sup>-3</sup>) aumentou o teor de Zn nos grãos de soja (Figura 1), seguindo um modelo quadrático.



**Figura 1.** Teor de Zn nos grãos de soja (mg kg<sup>-1</sup>) em função de doses foliares de Zn em plantas cultivadas com a aplicação de 4 mg dm<sup>-3</sup> de Zn no solo.

O teor máximo de Zn nos grãos estimado foi de 68,45 mg kg<sup>-1</sup>, o qual foi obtido com a dose foliar de 23,0 kg ha<sup>-1</sup>. Este teor equivale a um aumento de 95,0 % no teor de Zn nos grãos quando comparado ao controle, sem aplicação de Zn no solo e foliar. Com a aplicação da dose referência de Zn no solo (4 mg dm<sup>-3</sup>), sem aplicação foliar, o teor de Zn no grão de soja foi 51,6 mg kg<sup>-1</sup>. Portanto, a adubação foliar aumentou o teor de Zn nos grãos em 16,9 mg kg<sup>-1</sup>, ou seja, um aumento de 32,7 % no teor de Zn no grão.

As taxas de recuperação de Zn pelos grãos foram, em média, maiores para as doses de Zn aplicadas no solo (4,3 %) em relação às doses de Zn aplicadas na folhagem (0,4 %). Estes resultados mostram que a eficiência de absorção de Zn é maior na aplicação de Zn no solo em relação à foliar. No entanto, como o objetivo principal dos estudos de biofortificação de alimentos é promover o enriquecimento dos grãos com Zn, a fertilização foliar deve ser realizada, já que é com esta prática que os maiores teores de Zn nos grãos são alcançados.

A demanda de Zn pelos seres humanos está em torno de 15 mg d<sup>-1</sup> (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1989). Dessa forma, seria necessário o consumo de 244 g de grãos de soja com o teor máximo encontrado para suprir a demanda diária do micronutriente, considerando 10 % de umidade nos grãos e 100 % de biodisponibilidade de Zn para o organismo.

Os resultados observados corroboram com os trabalhos de Yilmaz et al. (1997), Kutman et al. (2010), Hussain et al. (2012) e Cambraia (2015), nos quais foi verificada a eficiência da combinação das adubações no solo e foliar em promover o aumento do conteúdo de Zn dos grãos de diferentes culturas. Esse máximo teor de Zn encontrado nos grãos da soja (68,45 mg kg<sup>-1</sup>) foi superior ao máximo teor de Zn alcançado em culturas como arroz (35 mg kg<sup>-1</sup>), trigo (38 mg kg<sup>-1</sup>) e semelhante ao feijão (67,50 mg kg<sup>-1</sup>), encontrados por Wissuwa et al. (2008), Cakmak et al. (2010) e Cambraia (2015), respectivamente. Grãos de leguminosas geralmente acumulam maior quantidade de Zn que grãos de cereais, visto que possuem maior teor de proteínas, que são importantes drenos para o Zn (WHITE; BROADLEY, 2009).

Na avaliação da variação genotípica do teor de Zn nos grãos de 24 cultivares de soja plantadas no Brasil, Oliveira et al. (2016) constatou que a média do teor de Zn no grão foi de 40 mg kg<sup>-1</sup> e o teor máximo encontrado foi de 48 mg kg<sup>-1</sup>. Isso indica que, apesar de existir a variabilidade genética para o teor de Zn nos grãos entre as cultivares, os teores convencionalmente encontrados são menores que os encontrados no presente



estudo. Portanto, a estratégia de biofortificação agronômica por meio do manejo da adubação é viável para a cultura da soja.

Apesar do presente estudo indicar ter se alcançado o teor máximo de Zn nos grãos de soja, Inocencio (2014) mostrou ser possível alcançar valores próximos 80 mg kg<sup>-1</sup>, evidenciando que a soja apresenta um potencial ainda maior de biofortificação agronômica. No entanto, esse autor utilizou somente fertilização no solo. Portanto, são necessários mais estudos para determinar a melhor combinação de aplicação do Zn (via foliar e via solo) para obter alto teor de Zn nos grãos com o menor custo, além de conhecer se este Zn presente no grão apresenta boa disponibilidade para seres humanos.

### **3.1.3 Efeito da adubação com Zn nos teores dos demais nutrientes**

Para avaliar a relação entre o aumento do teor de Zn e o teor de outros minerais nos grãos da soja, foi realizada uma análise de correlação linear de Pearson (Tabela 3) entre o teor de Zn no grão e o teor dos nutrientes N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe e Mn. O aumento no teor de Zn no grão não apresentou relação sobre o teor dos demais nutrientes, exceto para o Ca e Mg, para os quais correlações significativas e positivas foram encontradas.

O aumento no teor de Zn no grão não esteve associado ao aumento de teor de P. Este é um importante resultado em se tratando da biodisponibilidade do Zn para seres humanos, uma vez que existe forte correlação entre o teor de P no grão de soja e o teor de fítico, o qual é um fator antinutricional que diminui a disponibilidade do Zn para os seres humanos. Portanto, é desejável que não haja aumento do teor de P, e consequentemente, de fítico em grãos em estudos que visem a biofortificação de alimentos (LOLAS et al., 1976; RABOY et al., 1984; OLIVEIRA et al., 2016).

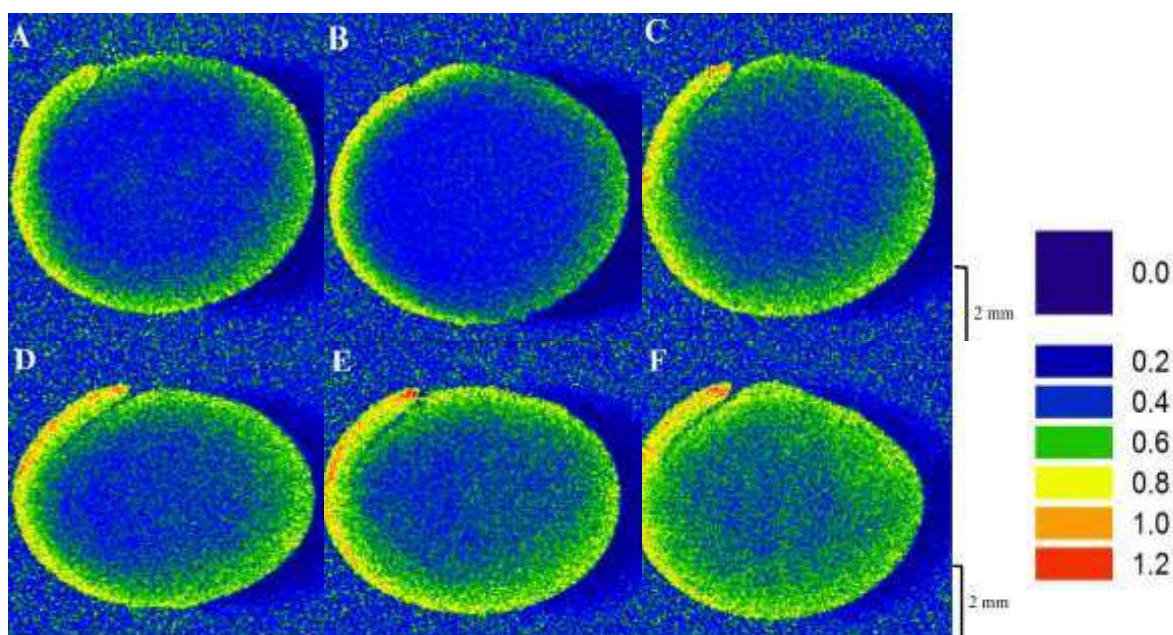
Estudos mostram que existe baixa correlação entre o aumento do teor de Zn no grão e dos demais macro e micronutrientes na soja (INOCENCIO, 2014; OLIVEIRA et al., 2016). No feijoeiro, Cambraia (2015) também encontrou baixa correlação entre o teor de Zn e os demais nutrientes no grão.

**Tabela 3.** Matriz dos coeficientes de correlação linear simples entre os teores de nutrientes nos grãos de soja.

| Correlações | Cu                             | Fe    | Mn   | Ca                            | Mg    | P    | K                    | N    |
|-------------|--------------------------------|-------|------|-------------------------------|-------|------|----------------------|------|
|             | -----mg.kg <sup>-1</sup> ----- |       |      | -----g.kg <sup>-1</sup> ----- |       |      | dag.kg <sup>-1</sup> |      |
| Zn          | 0,52                           | -0,28 | 0,56 | 0,95**                        | 0,87* | 0,65 | 0,74                 | 0,45 |

\*, \*\* Significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste t. <sup>ns</sup> não significativo. n = 30.

### 3.1.4 Localização do Zn nas sementes



**Figura 2:** Localização do Zn no grão de soja por espectrometria de microfluorescência de raios X por dispersão de energia ( $\mu$ EDXRF). Teor médio de Zn nas amostras: A- 26,89 mg kg<sup>-1</sup>; B- 50,39 mg kg<sup>-1</sup>; C- 58,04 mg kg<sup>-1</sup>; D- 57,54 mg kg<sup>-1</sup>; E- 65,29 mg kg<sup>-1</sup>; F- 70,79 mg kg<sup>-1</sup>.

Os mapas microquímicos dos grãos de soja (Figura 2) indicam que o acúmulo de Zn nos grãos ocorre preferencialmente no eixo embrionário. Nessa figura, observa-se aumento da intensidade da cor vermelha nos grãos com a elevação dos teores de Zn nos grãos. Também foi verificado que após saturação de Zn no eixo embrionário, ocorreu acúmulo de Zn nos cotilédones, conforme sugere o aumento na coloração amarela no interior do grão com aumento na concentração de Zn no grão.

Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Cakmak et al. (2010), em trigo, e por Cambraia (2015), em feijão. O acúmulo de Zn no eixo embrionário é importante para o desenvolvimento inicial da plântula, etapa em que o Zn exerce importante papel

em funções como a síntese de proteínas e alongamento das células (CAKMAK, 2000; OZTURK et al. 2006). A maior concentração de Zn no embrião pode explicar o melhor desenvolvimento inicial e maior vigor de plântulas oriundas de sementes enriquecidas com Zn (RENGEL; GRAHAM, 1995; YILMAZ et al., 1998).

### **3.2 Efeito do enriquecimento com Zn em aspectos produtivos da cultura**

#### **3.2.1 Qualidade fisiológica das sementes enriquecidas com Zn**

O teor de Zn nas sementes não influenciou a emergência de plantas (EP), a velocidade de emergência (VE), o índice de velocidade de emergência (IVE) e a massa de matéria seca de plântulas (*mMS\_Pl*). As médias para estas variáveis foram 94,1 %; 5,2 d; 9,1 plântulas d<sup>-1</sup> e 6,0 g. Esses resultados indicam que sementes com alto teor de Zn possuem a mesma qualidade fisiológica que as com teor mais baixo de Zn.

No caso do arroz, o aumento dos teores de Zn na semente de 18 a 67 mg kg<sup>-1</sup> elevaram a produção de massa de matéria seca de raízes e coleóptilo e melhorou a qualidade fisiológica das sementes Boonchuay et al. (2013). Adicionalmente, esse aumento no teor de Zn também causou o aumento no comprimento da radícula e coleóptilo das plântulas até o 3º e 5º dias após a germinação, respectivamente.

Na cultura do trigo, Rengel; Graham (1995) mostraram que o aumento no conteúdo de Zn de 0,25 para 0,70 µg semente<sup>-1</sup> aumentou a massa de matéria seca da radícula e epicótilo das plântulas, em condições de deficiência de Zn no solo. Para esta mesma cultura, sementes com conteúdo de Zn de 1,5 µg semente<sup>-1</sup> tiveram maior vigor e estabelecimento das plântulas no campo que sementes com conteúdo de 0,4 µg semente<sup>-1</sup>, em solo também deficiente em Zn (YILMAZ et al., 1998).

O teor de Zn das sementes do tratamento controle deste estudo foi 35,1 mg kg<sup>-1</sup>, valor próximo do teor médio de Zn de cultivares de soja plantadas no Brasil, que é de 40 mg kg<sup>-1</sup> (OLIVEIRA et al., 2016). Isto indica que o solo utilizado na fase de enriquecimento, apesar de apresentar baixo teor de Zn pelo Mehlich-1, permitiu que as sementes acumulassem Zn nos grãos em quantidade próxima à convencionalmente encontrada e suficiente para garantir a boa qualidade e o bom desenvolvimento das plântulas.

### 3.2.2 Teste de produtividade

As variáveis  $nG_{Vg}$ ,  $nVg_V$ ,  $mCG$  e  $mMS_V$ , que compõem os aspectos produtivos da soja, não sofreram variações significativas em decorrência da variação no teor de Zn nas sementes e das doses de Zn no solo na produtividade da cultura. As médias para estas variáveis foram, respectivamente, 83,1; 1,8; 18,2 g e 24,2 g.

Resultados diferentes foram encontrados por Yilmaz et al. (1998) para a cultura do trigo, cuja produtividade das plantas oriundas de sementes com conteúdo de Zn igual a  $1,5 \mu g \text{ semente}^{-1}$  foi duas vezes maior comparada aquelas com apenas  $0,4 \mu g \text{ semente}^{-1}$ . Harris et al. (2007) verificaram que sementes de milho com teor de Zn igual a 220 mg  $kg^{-1}$  originam plantas com produtividade 27 % maior que plantas oriundas de sementes com 15 mg  $kg^{-1}$  de Zn.

Segundo Cakmak (2008), o Zn contido nas sementes tem papel fundamental no desenvolvimento inicial de plantas recém germinadas. Portanto, é de se esperar que os aumentos na produtividade das plantas oriundas de sementes enriquecidas com Zn se deem pelo melhor desenvolvimento inicial destas plantas. No entanto, no presente trabalho, não foi verificado efeito do teor de Zn nas sementes sobre sua qualidade fisiológica.

A ausência de efeitos significativos do enriquecimento das sementes com Zn na produção de grãos da cultura pode ser explicada pelo alto teor de Zn nos grãos encontrado no tratamento controle. O solo utilizado nesta etapa parece apresentar teor de Zn suficiente para possibilitar o acúmulo de Zn na semente em níveis convencionalmente encontrados e não afetar a produtividade da soja, apesar de seu teor de Zn pelo extrator Mehlich-1 ser classificado como baixo. Este fato pode explicar a ausência de efeito significativo para o fator dose.

#### 4. CONCLUSÕES

A combinação da adubação foliar e do solo se mostrou eficiente em aumentar teor de Zn nos grãos de soja. Porém, esta prática não apresentou efeito sobre a produção nas condições estudadas.

O aumento no teor de Zn não apresentou relação significativa sobre o teor dos demais nutrientes, exceto para o Ca e Mg, para os quais correlações significativas e positivas foram encontradas.

O Zn se acumulou preferencialmente no eixo embrionário das sementes. No entanto, também houve acúmulo de Zn nos cotilédones quanto maiores as concentrações de Zn na semente.

O enriquecimento das sementes com Zn, na faixa de teor de 35,1 a 68,5 mg kg<sup>-1</sup> não teve efeito na qualidade fisiológica das sementes e nem na produtividade da cultura.

Os grãos de soja podem ser biofortificados com Zn pelo manejo da adubação da cultura. Porém, são necessários mais estudos para avaliar a biodisponibilidade do Zn para os seres humanos e para permitir a aplicação da técnica de biofortificação em condições de campo com eficiência semelhante à alcançada em casa de vegetação.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALICEWEB. 2016. <http://aliceweb.mdic.gov.br>. Acesso em: 20 de abril de 2017.
- ALLOWAY, B.J. 2004. Zinc in soils and crop nutrition. IZA Publications. **International Zinc Association**, Brussels, p. 1–116.
- ALVAREZ, V.V.H.; DIAS, L.E.; RIBEIRO, A.C.; SOUZA, R.B. Uso de Gesso Agrícola. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.V.H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5. Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 67-78.
- ALVAREZ, V. H. V.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 27-32, jan./mar. 2000.
- BLACK, R.E.; ALLEN, L.H.; BHUTTA, Z.A.; CAULFIELD, L.E.; DE ONIS, M.; EZZATI, M.; MATHERS, J.R. Maternal and child undernutrition: global and regional exposures and health consequences. **The lancet**, v. 371, n. 9608, p. 243-260, 2008.
- BOONCHUAY, P.; CAKMAK, I.; RERKASEM, B.; PROM-U-THAI, C. Effect of different foliar zinc application at different growth stages on seed zinc concentration and its impact on seedling vigor in rice. **Soil science and plant nutrition**, v. 59, n. 2, p. 180-188, 2013.
- CAKMAK, I. **Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways**. In: Progress in Plant Nutrition: Plenary Lectures of the XIV International Plant Nutrition Colloquium. Springer Netherlands, 2002. p. 3-24.
- CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification. **Plant Soil**, v. 302, p. 1–17, 2008.
- CAKMAK, I. Enrichment of fertilizers with zinc: An excellent investment for humanity and crop production in India. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 23, n. 4, p. 281-289, 2009.

CAKMAK, I.; KALAYCI, M.; KAYA, Y.; TORUN, A.A.; AYDIN, N.; WANG, Y.; ARISOY, Z.; ERDEM, H.; YAZICI, A.; GOKMEN, O.; OZTURK, L.; HORST, W.J. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. **J. Agric Food Chem**, v. 58, p. 9092 – 9102, 2010.

CAMBRAIA, T.L.L. **Biofortificação agrônômica do feijão pelo manejo da adubação com Zn**. 2015. 49 p. (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2015.

CARMO, C.A.F.S.; ARAÚJO, W.S.; BERNARDI, A.C.C.; SALDANHA, M.F.C. **Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa solos**. Embrapa Solos. Circular Técnica 6, ISSN 1517-5146, 41p.

CARNEIRO, L.F.; FURTINI NETO, A.E.; RESENDE, Á. V.D.; CURI, N.; SANTOS, J.Z.L.; LAGO, F.J.D. **Fontes, doses e modos de aplicação de fósforo na interação fósforo-zinco em milho**. 2008.

CARRÃO-PANIZZI, M. C.; MANDARINO, J. M. G. Soja: **Potencial de Uso na Dieta Brasileira**. 1998. EMBRAPA, Londrina – PR. Documentos, 113, 16p.

CARVALHO, N.; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. Jaboticabal-SP, 2000.

CESB. 2016. Comitê Estratégico de Soja **Brasil**. Disponível em: <<http://www.cesbrasil.org.br/>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2017.

CONAB. 2016. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2017.

FAGERIA, N.K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 390-395, 2000.

FEHR, W.R., CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. 12p. (Special Report, 80).

GALRÃO, E.Z. **Micronutrientes**. In: SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. (Ed.). Cerrado: correção do solo e adubação. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p.185-226.

GONÇALVES JUNIOR, A.C.; NACKE, H.; MARENGONI, N. G.; DE CARVALHO, E. A.; COELHO, G. F. Produtividade e componentes de produção da soja adubada com diferentes doses de fósforo, potássio e zinco. **Ciência e Agrotecnologia, Lavras**, v. 34, n. 3, p. 660-666, 2010.

GOSELINK, R. M. A.; JONGBLOED, A. W., 2012, Zinc and Copper in dairy cattle feeding, Report 519, Reference ISSN 1570 – 8616, Wageningen UR Livestock Research.

HARRIS, D.; RASHID, A.; MIRAJ, G.; ARIF, M.; SHAH, H. ‘On-farm’seed priming with zinc sulphate solution—A cost-effective way to increase the maize yields of resource-poor farmers. **Field Crops Research**, v. 102, n. 2, p. 119-127, 2007.

HOTZ, C.; BROWN, K. H. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. **Food Nutrition**, v. 25, n. n 1, p. 94–204, 2004.

HUSSAIN, S. et al. Biofortification and estimated human bioavailability of zinc in wheat grains as influenced by methods of zinc application. **Plant and Soil**, v. 361, p. 279–290, 2012.

INOCENCIO, M. F. **Frações de zinco no solo e Biofortificação Agrônômica com selênio , ferro e zinco em soja e trigo**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavras, 2014.

KUTMAN, U.B.; YILDIZ, B.; OZTURK, L.; CAKMAK, I. Biofortification of Durum Wheat with Zinc Through Soil and Foliar Applications of Nitrogen. **Cereal Chemistry**, v. 87, n. 1, p. 10–20, 2010.

LOLAS, G. M.; PALAMIDIS, N.; MARKAKIS, P. The phytic acid-total phosphorus relationship in barley, oats, soybeans and wheat. **Cereal Chemistry**, 1976.



LINDSAY, W.L. 1991. Inorganic equilibria affecting micronutrients in soils. In: MORTVEDT, J.J.; COX, F.R.; SHUMAN, L.M.; WELCH, R.M. (eds). **Micronutrients in Agriculture**. SSSA Book Series No. 4. Madison, W.I. p. 89–112.

LOPES, A.S. **Solos sob cerrado: características, propriedades e manejo**. Piracicaba: POTAFÓS, 1984. 162p.

MAO, H.; Wang, J.; Wang, Z.; Zan, Y.; Lyons, G.; Zou, C. Using agronomic biofortification to boost zinc, selenium, and iodine concentrations of food crops grown on the loess plateau in China. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.14, p.459-470, 2014.

MAGUIRE, J.D. Speed of germination—aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop science**, v. 2, n. 2, p. 176-177, 1962.

MARSCHNER, H. (1993) Zinc uptake from soils. In: Robson AD (ed) Zinc in Soils and Plants. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, p 59–77.

MARTENS, D.C.; WESTERMANN, D.T. **Fertilizers applications for correcting micronutrient deficiencies**. In: MORTVEDT, 3.1.; COX, F.R.; SHUMAN, L.M.; WELCH, R.M. (Eds.). **Micronutrients in agriculture**. 2.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 549-592.

MILLER, W. J. Zinc nutrition of cattle: a review. *Journal of Dairy Science*. v.53. p. 1123–1135. 1970.

MOUSAVI, S.R. Zinc in crop production and interaction with phosphorus. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 5, n. 9, p. 1503-1509, 2011.

NAKAGAWA, J. **Testes de vigor baseados no desempenho de plântulas**. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; FRANÇA NETO, J.B. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. cap.2, p.1-24.

NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. de. **Ensaio em ambiente controlado**. In: OLIVEIRA, A.J. et al. (Coords.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília, DF: Embrapa-SEA, 1991. p.189-253.

National Research Council Recommended Dietary Allowances (1989). **Subcommittee on the Tenth Edition of the RDAs Food and Nutrition Board, Commission on Life Sciences**. 10.ed. National Academy Press, Washington, DC. 1989.

OZTURK, L.; YAZICI, M. A.; YUCEL, C.; TORUN, A.; CEKIC, C.; BAGCI, A.; OZKAN, H.; BRAUN, H.; SAYERS, Z.; CAKMAK, I. Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. **Physiologia Plantarum**, v. 128, n. 1, p. 144-152, 2006.

QUI, CHANG. The origion and history of soybean. In: SINGH, G. The soybean: Botany, Production an uses. CABI, UK. Cap. 1, p. 1-23. 2010.

RENGEL, Z.; GRAHAM, R.D. Importance of seed Zn content for wheat growth on Zn-deficient soil – II grain yield. **Planta and Soil Dordrecht**, v.173, n.3, p.267-274, 1995.

OLIVEIRA, N. P. et al. Genotypic variation of agronomic traits as well as concentrations of Fe , Zn , P and phytate in soybean cultivars. **Revista Ceres**, v. 63, p. 403-411, 2016.

RABOY, V.; DICKINSON, D. B.; BELOW, F. E. Variation in seed total phosphorus, phytic acid, zinc, calcium, magnesium, and protein among lines of Glycine max and G. soja. **Crop Science**, v. v. 24, n. 3, p. 431–434, 1984.

RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte+ argila). **Bras. Ci. Solo**, v. 29, n. 2, p. 297-300, 2005.

SLATON, N.A.; WILSON, C.E.; NTAMATUNGIRO, S.; NORMAN, R.J.; BOOTHE, D.L. Evaluation of zinc seed treatments for rice. **Agronomy Journal**, v. 93, n. 1, p. 152-157, 2001.

WISSUWA, M.; ABDELBAGI, M.; CAKMAK, I.; GRAHAM, R. D. Rice grain zinc concentrations as affected by genotype, native soil-zinc availability, and zinc fertilization. **Plant and Soil**, v. 306, p. 37-48, 2008.

WHITE, P.J.; BROADLEY, M.R. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets–iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. **New Phytologist**, v. 182, n. 1, p. 49-84, 2009.

YILMAZ, A., EKİZ, H., TORUN, B., GULTEKIN, I., KARANLIK, S., BAGCI, S. A.; CAKMAK, I. Effect of different zinc application methods on grain yield and zinc concentration in wheat cultivars grown on calcareous soils with zinc deficiency. **J. Planta Nutr.**, vol. 20, p. 461-471, 1998.