UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR

NUTRIÇÃO, PRODUÇÃO E BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM ZINCO EM CULTIVARES DE FEIJOEIRO-COMUM

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

WAGNER DECKIJ KACHINSKI

GUARAPUAVA-PR

2019

WAGNER DECKIJ KACHINSKI

NUTRIÇÃO, PRODUÇÃO E BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM ZINCO EM CULTIVARES DE FEIJOEIRO-COMUM

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Fabrício William de Ávila

Orientador

Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Muller

Coorientador

Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis

Coorientador

GUARAPUAVA-PR

2019

Catalogação na Publicação
Biblioteca Central da UNICENTRO, Campus Santa Cruz

K11n

Kachinski, Wagner Deckij
Nutrição, produção e biofortificação agronômica com zinco em feijoeiro-comum / Wagner Deckij Kachinski. – – Guarapuava, 2019.
xiii, 75 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, 2019

Orientador: Fabrício William de Ávila
Coorientador: Marcelo Marques Lopes Muller
Coorientador: André Rodrigues dos Reis
Banca examinadora: Valdemar Faquin, Jackson Kawakami, Fabrício William de Ávila

Bibliografia

1. Agronomia. 2. Produção vegetal. 3. *Phaseolus vulgaris* L.. 4. Fertilidade do solo. 5. Nutrição de plantas. 6. Micronutriente. 7. Segurança alimentar. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

CDD 630

Wagner Deckij Kachinski

NUTRIÇÃO, PRODUÇÃO E BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM ZINCO EM CULTIVARES DE FEIJOEIRO-COMUM

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 21 de fevereiro de 2019.

Impresso com recursos públicos por lucilia na UNICENTRO

Prof. Dr. Fabricio William de Ávila
(UNICENTRO)

Prof. Dr. Jackson Kawakami
(UNICENTRO)

Prof. Dr. Valdemar Faquin
(UFLA)

GUARAPUAVA-PR

2019

"Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes".

(Marthin Luther King)

"All that I am, or hope to be, I owe to an angel, my mother"

(Abraham Lincoln)

À MINHA MÃE, EU DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por manter a minha fé e me dar forças para chegar aonde eu quero.

Agradeço aos meus pais Ednilson e Salem, que sempre me apoiaram e nunca me deixarem desistir, além de não medirem esforços pra que eu chegasse até aqui.

Aos meus irmãos Ynaê e Allan, por sempre me acompanharem e estarem do meu lado quando precisei, desde o início da graduação até hoje.

Agradeço a minha namorada Thais, pela paciência, dedicação e por sempre me apoiar para não desistir desse sonho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Fabrício William de Ávila, pelos ensinamentos, auxílio e preocupação em sempre estar presente e ajudando no que pôde durante esse tempo.

Agradeço ao meu coorientador Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Muller pelos ensinamentos, auxílio e disponibilização do Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas da UNICENTRO para realização das análises de composição nutricional de folhas e grãos utilizados no experimento.

Agradeço ao meu coorientador Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis pelos ensinamentos, auxílio e disponibilização do Laboratório de Biologia da UNESP – Campus Tupã para realização das análises de qualidade nutricional de folhas e grãos utilizados no experimento.

Agradeço aos amigos Luiz Henrique, José Leonardo, Gabriela, Fabiola, Allan, Eloi, dente outros que ajudaram de alguma forma nas atividades desempenhadas durante o experimento.

Agradeço aos orientados do Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis, Roberto, Nandhara e Ana Julia, pelo tempo e ajuda prestada durante o período de atividades realizadas no do Laboratório de Biologia da UNESP – Campus Tupã.

Agradeço ao Luis e a Luanna do Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas da UNICENTRO, e à Milena e Yasmin do Laboratório de Biologia da UNESP – Campus Tupã, pelo auxílio nas análises realizadas.

E por fim, agradeço a todos os amigos e amigas que de alguma forma me ajudaram e torceram por mim para que eu realizasse mais esta conquista.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS i
LISTA DE FIGURAS ii
RESUMO iv
ABSTRACT vi
1. INTRODUÇÃO 1
2. OBJETIVOS 2
2.1. Objetivo geral 2
2.2. Objetivos específicos 2
3. CAPÍTULO 1 – REFERENCIAL TEÓRICO 3
3.1. Insegurança alimentar e a biofortificação de culturas agrícolas 3
3.2. Zinco no solo e na planta 6
3.3. Zinco e a nutrição humana 9
3.4. A cultura do feijoeiro-comum 10
3.5. Propriedades nutricionais dos grãos de feijoeiro-comum 14
3.5.1. Proteínas de reserva e aminoácidos 14
3.5.2. Açúcares totais e sacarose 15
3.6. Biofortificação com zinco na cultura do feijoeiro-comum 16
3.7. Referências Bibliográficas 17
4. CAPÍTULO 2 – BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM ZINCO EM FEIJOEIRO-COMUM 26
4.1. Resumo 26
4.2. Abstract 27
4.3. Introdução 28
4.4. Material e Métodos 30
4.4.1. Descrição da área experimental 30
4.4.2. Tratamentos e delineamento experimental 30
4.4.3. Avaliação da produtividade de grãos e teores de Zn nos grãos e nas vagens 32
4.4.4. Determinação dos teores de açúcares totais, sacarose, aminoácidos totais e proteínas de reserva (albuminas, globulinas, glutelinas e prolaminas) nos grãos .. 33
4.4.5. Análise estatística dos dados 33
4.5. Resultados e Discussão 34
4.5.1. Produtividade e teores de Zn nos grãos e nas vagens 34

4.5.2. Teores de aminoácidos totais, sacarose, açúcares totais e proteínas de reserva (albuminas, globulinas, glutelinas e prolaminas) nos grãos 40
4.6. Conclusões 47
4.7. Referências Bibliográficas 47
5. CAPÍTULO 3 – NUTRIÇÃO, PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES EM FEIJOEIRO-COMUM SOB FERTILIZAÇÃO DE ZINCO EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO 53
5.1. Resumo 53
5.2. Abstract 54
5.3. Introdução 55
5.4. Material e Métodos 57
5.4.1. Descrição da área experimental e instalação dos experimentos 57
5.4.2. Tratamentos e delineamento experimental 59
5.4.3. Avaliações de produtividade de grãos, altura de inserção da primeira vagem e teores de nutrientes nas folhas e grãos 60
5.4.4. Análise estatística dos dados 61
5.5. Resultados e Discussão 61
5.5.1. Produtividade de grãos e altura de inserção de primeira vagem 61
5.5.2. Teor foliar e exportação de Zn 63
5.5.3. Teores foliares e exportação de macro e micronutrientes 67
5.6. Conclusões 71
5.7. Referências Bibliográficas 71
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Etapas do desenvolvimento da planta de feijoeiro-comum. 12

Tabela 2. Composição nutricional em 100 g de grãos (cru) de feijão preto e carioca... 13

Tabela 3. Análise química do solo da área experimental em amostra composta da camada de 0-20 cm de profundidade. 58

Tabela 4. Teores foliares de nutrientes (3as folhas com pecíolo a partir do terço médio da planta) em feijoeiro-comum 'BRS Esteio' e 'IPR Campos Gerais', em função da aplicação foliar e via solo de Zn, na safra de verão 2017/2018..... 68

Tabela 5. Estimativa de exportação de nutrientes da área com a colheita de grãos em feijoeiro-comum 'BRS Esteio' e 'IPR Campos Gerais', em função da aplicação foliar e via solo de Zn, na safra de verão 2017/2018. 70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Teor de Zn nos grãos em feijoeiro-comum 'BRS Esteio', em função de doses de Zn (0, 300, 600, 900, 1200 e 1500 g ha^{-1}) aplicadas via foliar no estádio inicial de enchimento de grãos, na safra de verão 2016/2017. 35

Figura 2. Teor de Zn nos grãos em feijoeiro-comum 'BRS Esteio', em função da aplicação de Zn via solo (sem e com Zn no solo) e aplicação foliar em diferentes épocas e números de pulverizações (Figura 2A), e em feijoeiro-comum 'IPR Campos Gerais', em função da aplicação foliar em diferentes épocas e números de pulverizações (Figura 2B), na safra de verão 2017/2018. 36

Figura 3. Teor de Zn nas vagens em feijoeiro-comum 'BRS Esteio', em função da aplicação de doses de Zn via foliar (0, 300, 600, 900, 1200 e 1500 g ha^{-1}) no estádio inicial de enchimento de grãos, na safra de verão 2016/2017. 38

Figura 4. Teor de Zn nas vagens em feijoeiro-comum 'BRS Esteio' (Figura 4A) e 'IPR Campos Gerais' (Figura 4B), em função da aplicação foliar de Zn em diferentes épocas e números de pulverizações, na safra de verão 2017/2018. 39

Figura 5. Teores de aminoácidos totais (Figura 5A), sacarose (Figura 5B) e açúcares totais (Figura 5C) nos grãos em feijoeiro-comum 'BRS Esteio', em função da aplicação de doses de Zn via foliar (0, 300, 600, 900, 1200 e 1500 g ha^{-1}) no estádio inicial de enchimento de grãos, na safra de verão 2016/2017. 41

Figura 6. Teores de aminoácidos totais (Figuras 6A e 6B) e sacarose (Figuras 6C e 6D), em função da aplicação de Zn via solo (sem e com Zn no solo) e via foliar em diferentes épocas e números de pulverizações, e teores de açúcares totais (Figuras 6E e 6F), em função da aplicação de Zn via foliar em diferentes épocas e números de pulverizações, em grãos de feijoeiro-comum 'BRS Esteio' e 'IPR Campos Gerais', na safra de verão 2017/2018. 42

Figura 7. Teores de proteínas de reserva, albuminas (Figura 7A), globulinas (Figura 7B), prolaminas (Figura 7C) e glutelinas (Figura 7D) nos grãos em feijoeiro-comum 'BRS Esteio', em função da aplicação de doses de Zn via foliar (0, 300, 600, 900, 1200 e 1500 g ha^{-1}) no estádio inicial de enchimento de grãos, na safra de verão 2016/2017. 44

Figura 8. Teores de proteínas de reserva albuminas (Figuras 8A e 8B), globulinas (Figuras 8C e 8D), prolaminas (Figuras 8E e 8F) e glutelinas (Figuras 8G e 8H) nos grãos em feijoeiro-comum 'BRS Esteio' e 'IPR Campos Gerais', em função da aplicação de Zn via solo (sem e com Zn no solo) e via foliar em diferentes épocas e números de pulverizações, na safra de verão 2017/2018. 45

Figura 9. Valores semanais de precipitação pluviométrica e temperatura média máxima e mínima na área durante o período de condução dos experimentos que ocorreu entre 18 de dezembro de 2017 a 5 de abril de 2018. 57

Figura 10. Fotografia mostrando as duas cultivares de feijoeiro-comum na área experimental, cultivada em sistema de plantio direto..... 59

Figura 11. Produtividade de grãos em feijoeiro-comum 'BRS Esteio' (A) e 'IPR Campos Gerais' (B) em função da aplicação foliar de Zn, na safra de verão 2017/2018. 61

Figura 12. Altura de inserção da primeira vagem em feijoeiro-comum 'BRS Esteio' em estádio de maturação de grãos, em função da aplicação foliar e via solo de Zn, na safra de verão 2017/2018. 62

Figura 13. Teor foliar de Zn (3as folhas com pecíolo a partir do terço médio da planta, coletadas 10 dias após a aplicação dos tratamentos de pulverização foliar de Zn) em feijoeiro-comum 'BRS Esteio' (A) e 'IPR Campos Gerais' (B), em função da aplicação foliar e via solo de Zn, na safra de verão 2017/2018..... 64

Figura 14. Estimativa de exportação de Zn da área com a colheita de grãos em feijoeiro-comum 'IPR Campos Gerais', em função da aplicação foliar de Zn, na safra de verão 2017/2018. 66

RESUMO

KACHINSKI, W. D. **Nutrição, produção e biofortificação agronômica com zinco em cultivares de feijoeiro-comum**. Guarapuava: UNICENTRO, 2019. 75 p. (Dissertação – Mestrado em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal).

A deficiência de zinco (Zn) afeta bilhões de pessoas em todo o mundo. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da aplicação de Zn no solo (durante a semeadura) e via foliar (por meio de pulverizações foliares de doses de Zn em diferentes estádios fenológicos) sobre a nutrição da planta, produtividade e qualidade nutricional dos grãos e exportação de nutrientes da área com a colheita dos grãos, em feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado em sistema de plantio direto. Experimentos de campo com as cultivares BRS Esteio (pertencente ao grupo de feijão preto) e IPR Campos Gerais (pertencente ao grupo de feijão carioca) foram conduzidas em duas safras de verão (2016/2017 e 2017/2018). Na 1ª safra (2016/2017) os tratamentos foram constituídos de aplicações foliares de doses de Zn no estádio de enchimento de grãos utilizando-se apenas a cultivar BRS Esteio; e na 2ª safra (2017/2018) os tratamentos foram realizados em dois experimentos compostos pela aplicação de Zn no solo durante a semeadura e pela pulverização foliar de Zn em diferentes estádios fenológicos, utilizando-se as cultivares BRS Esteio e IPR Campos Gerais. As aplicações de Zn via solo e, ou, foliar durante o período de florescimento elevaram a altura de inserção de primeira vagem da cultivar BRS Esteio, mas não houve efeito na cultivar IPR Campos Gerais. A pulverização foliar de Zn na época do florescimento (estádio fenológico R6) elevou em, aproximadamente, duas vezes o teor foliar de Zn em ambas as cultivares de feijoeiro-comum, porém, afetou negativamente a produtividade de grãos da cultivar BRS Esteio. Por outro lado, a aplicação foliar de Zn durante os estádios inicial e final de enchimento de grãos (estádio fenológico R8) não influenciou na produtividade de grãos de ambas as cultivares. Sem a aplicação dos tratamentos de Zn, as exportações médias de nutrientes da área com os grãos colhidos de ambas as cultivares obedeceram à ordem para os macronutrientes N > K > P > Ca ≈ S > Mg e à ordem para os micronutrientes Fe > Mn > Cu > Zn. A aplicação de Zn no solo resultou em maior exportação de P, K e Mn para a cultivar BRS Esteio e, também, em maior exportação de K para a cultivar IPR Campos gerais, enquanto que a pulverização foliar de Zn aumentou consideravelmente a exportação de Zn, P, Ca, Mg, S, Mn, Fe e Cu

para a cultivar IPR Campos Gerais. Tanto a aplicação de Zn no solo quanto a pulverização foliar de Zn elevaram o teor de Zn nos grãos da cultivar BRS Esteio; porém, nos grãos da cultivar IPR Campos Gerais houve apenas efeito da pulverização foliar. A pulverização foliar única de 600 g ha^{-1} de Zn no estádio inicial de enchimento de grãos mostrou ser a melhor forma de biofortificar os grãos de feijão com Zn, enquanto que no estádio final de enchimento de grãos a pulverização foliar favoreceu o aumento de teor de Zn nas vagens em detrimento do teor de Zn nos grãos. A aplicação de Zn via solo no sulco de semeadura resultou em maiores teores de aminoácidos totais e das proteínas de reserva albuminas, globulinas e prolaminas nos grãos de feijão, melhorando a qualidade nutricional.

Palavras-Chave: *Phaseolus vulgaris* L., nutrição de plantas, micronutriente, segurança alimentar

ABSTRACT

Deficiency of zinc (Zn) affects billions of people worldwide. The objective of this study was to evaluate the effect of the soil and foliar application of Zn on plant nutrition, yield, grain nutritional quality and biofortification, and nutrient export as a function of Zn fertilization in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under no-till system in an oxisol of the South region of Brazil. Two consecutive summer harvests (2016/17 and 2017/18 harvests) were carried out and two common bean cultivars were used: BRS Esteio (black bean) and IPR Campos Gerais (Carioca bean). In 2016/17 harvest year, treatments were composed of foliar applications of Zn doses at the stage of grain filling with the cultivar BRS Esteio, and in 2017/18 harvest year the treatments were both soil and foliar Zn application at different phenological stages with the cultivars BRS Esteio and IPR Campos Gerais. Soil and foliar Zn applications during the flowering period increased the insertion height of the first pod in cultivar BRS Esteio, but there was no effect on cultivar IPR Campos Gerais. Foliar Zn spraying at the flowering time (phenological stage R6) increased leaf Zn content by approximately two times in both common bean cultivars, but negatively affected the grain yield in cultivar BRS Esteio. Nonetheless, foliar Zn application during the initial and final stages of grain filling (phenological stage R8) did not influence the grain yield in both cultivars. In treatments without both soil and foliar Zn application, the descending order of nutrient export from the field was as follows: N > K > P > Ca ≈ S > Mg for macronutrients and Fe > Mn > Cu > Zn for micronutrients. Foliar Zn spray increased the Zn, P, Ca, Mg, S, Mn, Cu and Fe exports in grains of the cultivar IPR Campos Gerais, while soil Zn application resulted in higher P, K and Mn exports in grains of the cultivar BRS Esteio. Both soil and foliar Zn application considerably increased the grain Zn content in cultivar BRS Esteio, however, in cultivar IPR Campos Gerais there was only effect of the foliar Zn application. Single leaf spray of 600 g ha^{-1} of Zn at the initial grain filling stage was shown to be the best way to improve the grain Zn content. Foliar Zn spray at the final stage of grain filling favored the increase of pod Zn content in detriment of grain Zn content. The soil Zn application increased the concentrations of total amino acids and proteins (albumins, globulins and prolamins) in the bean grains, thus improving nutritional quality.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L., plant nutrition, micronutrient, nutritional safety

1. INTRODUÇÃO

O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das principais espécies leguminosas cultivadas no Brasil. A cultura apresenta um ciclo relativamente rápido e, dependendo da região do país, pode ser cultivada durante todo o ano, nas três safras. Os grãos apresentam valor comercial considerado alto, porém, o cultivo da espécie apresenta custo de produção relativamente elevado, sendo considerada uma cultura de risco, principalmente devido à sua suscetibilidade às variações climáticas e ao seu alto custo de produção.

O Brasil é considerado o maior consumidor de grãos de feijão do mundo, sendo um alimento imprescindível na cultura brasileira, compondo vários pratos, além do famoso "feijão com arroz". Daí é que surge a sua grande importância no cenário agrícola nacional.

O feijão, na alimentação humana, aliado ao arroz, satisfaz em grande parte a necessidade diária de proteínas necessárias às pessoas. Destaca-se que os grãos de feijão são ricos em proteínas, tais como a albumina e globulina, e nutrientes, dentre os quais o zinco (Zn) é encontrado com relativa expressão, sendo de 29 mg kg^{-1} segundo a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO, 2011).

O Zn, além de ser nutriente para a nutrição humana, é micronutriente para o crescimento vegetal. Porém, as principais culturas agrícolas apresentam baixa capacidade de acumular esse elemento nas partes comestíveis, especialmente nos grãos dos cereais, resultando em deficiência do nutriente nos alimentos básicos. No Brasil, há grande indicativo de baixo consumo de Zn pela população (SOUZA, 2013a; FIGUEIREDO, 2016), especialmente pela de baixa renda.

Os teores naturais de Zn nas plantas, animais e seres humanos, numa determinada região, estão diretamente relacionados com o teor desse elemento presente nos solos das áreas de cultivo, tendo as plantas um papel fundamental na introdução desse nutriente na cadeia alimentar. Nesse sentido, a adoção de práticas de cultivos que promovam o aumento na concentração de Zn nos alimentos básicos, como no caso o feijão, pela introdução desse elemento juntamente com as adubações via solo e, ou, foliar, associado com a seleção de cultivares mais promissoras em acumular o nutriente nos grãos, pode resultar em redução da deficiência de Zn no organismo humano.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar os efeitos da aplicação foliar e via solo de Zn sobre a nutrição de planta, exportação de nutrientes da área, produtividade e biofortificação e qualidade nutricional dos grãos em feijoeiro-comum.

2.2. Objetivos específicos

Avaliar se a aplicação de Zn via solo e, ou, foliar afeta a altura de inserção da primeira vagem e a produtividade de grãos em duas cultivares de feijoeiro-comum;

Determinar se a aplicação via solo e, ou, foliar de Zn na cultura do feijoeiro-comum pode afetar os teores de Zn e demais nutrientes na folha (3ªs folhas com pecíolo a partir do terço médio da planta em estádio fenológico de florescimento);

Verificar qual a melhor forma de fornecimento de Zn, aplicação no solo ou via pulverização foliar, visando a biofortificação dos grãos;

Determinar a melhor dose e época de aplicação foliar de Zn visando a biofortificação dos grãos;

Quantificar se há discrepância de acúmulo de Zn entre as vagens e grãos;

Avaliar se existe diferenças entre as duas cultivares de feijoeiro-comum mais cultivadas no Estado do Paraná quanto aos efeitos da fertilização foliar e via solo de Zn;

Avaliar se a aplicação de Zn via solo e, ou, foliar afeta os teores de aminoácidos totais, açúcares totais, sacarose e proteínas de reserva (albuminas, globulinas, prolaminas e glutelinas) nos grãos;

Estudar a exportação de nutrientes da área com a colheita dos grãos.

3. CAPÍTULO 1 – REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Insegurança alimentar e a biofortificação de culturas agrícolas

O crescimento populacional no mundo exigiu o consequente aumento da produção agrícola, que foi conseguido com a revolução verde; em contrapartida, resultou em perda de qualidade nutricional dos alimentos em geral, sendo que hoje a deficiência nutricional afeta mais da metade da população mundial, especialmente em pessoas de baixa renda (BOUIS, 2018). Essa desnutrição é causada diretamente pela falta de micronutrientes e vitaminas, destacando-se a vitamina A, ferro (Fe), selênio (Se), iodo (I) e zinco (Zn) (SHEKHAR, 2013; SOUZA, 2013a; BOUIS, 2018).

A deficiência nutricional em humanos muitas vezes é causada pela elevada ingestão de alimentos ricos em carboidratos, mas pobres em micronutrientes e vitaminas, por fatores antinutricionais presentes nos alimentos (fitatos que complexam o zinco deixando-o não disponível para a assimilação do organismo), perda de nutrientes durante o beneficiamento dos alimentos, ou ainda, pelo difícil acesso da população a alimentos mais concentrados em micronutrientes e vitaminas (MORAES et al., 2012).

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), o total de pessoas subnutridas atinge número considerável da população mundial, encontrando-se grande parte em países em desenvolvimento (BOUIS, WELCH; 2010; BOUIS et al., 2011). Os problemas de saúde causados pela deficiência de micronutrientes e vitaminas afeta mais de 2 bilhões de pessoas em todo o mundo, especialmente por Fe e Zn, sendo mais agravante em crianças, adolescentes e mulheres grávidas de países subdesenvolvidos (ALLOWAY, 2009; VELU et al., 2014). Cerca de 60 % da população mundial é afetada pela deficiência de Fe, enquanto que a deficiência de Zn afeta um terço da população mundial. Em países subdesenvolvidos, a deficiência desse micronutriente é citada como o quinto fator de risco para a saúde humana (WHO, 2002; WHO 2006; SOUZA, 2013a).

O solo de uma região é o principal fator que determina os teores de nutrientes nas plantas e, consequentemente, na alimentação humana e animal. Na maioria das vezes, os vegetais são a base para a introdução de nutrientes na cadeia trófica. Seguindo esse raciocínio, uma técnica que se mostra eficiente para aumentar a ingestão de micronutrientes na população, principalmente a de baixa renda, é a biofortificação de culturas agrícolas. Apesar dos cereais

constituírem uma grande porcentagem dos alimentos consumidos pela população mundial, a maior parte dessas espécies vegetais não são culturas acumuladoras de micronutrientes nas partes comestíveis, além de apresentarem baixa tolerância a vários micronutrientes quando se apresentam em altos teores no tecido vegetal (GRAHAM et al., 2007; WHITE; BROADLEY, 2009; CAKMAK et al., 2010; FIGUEIREDO, 2016).

A biofortificação de culturas agrícolas pode ocorrer por meio de práticas agronômicas (biofortificação agronômica) como o tratamento de sementes e adubação, e por meio de melhoramento genético das plantas produtoras de alimentos amplamente cultivadas (ZAMAN et al., 2017). A prática da biofortificação agronômica é citada como aquela realizada por meio da aplicação de adubos minerais contendo micronutrientes para humanos e animais, e no aumento da solubilização e mobilização desses no solo. A viabilidade dessa técnica dependente de diversos fatores como, por exemplo, a eficiência da planta em absorver e armazenar os micronutrientes nas partes comestíveis, do tipo e composição do solo, e da mobilização desses respectivos micronutrientes no sistema solo-planta (SALTZMAN et al., 2013). Neste sentido, a introdução de elementos essenciais ao organismo humano, através de adubações das principais culturas agrícolas em conjunto com a seleção de genótipos que apresentam maior capacidade de absorção e acúmulo desses nutrientes nos grãos, pode resultar em uma grande redução na deficiência de micronutrientes na população brasileira e mundial (WHITE et al., 2009, SOUZA, 2013a; FIGUEIREDO, 2016).

Oliveira (2016) em experimento realizado para a biofortificação de arroz, avaliando doses e métodos de aplicação de Se via solo e foliar (Se nas formas de selenato e selenito), observou elevação de Se nos grãos com o aumento das concentrações foliares do elemento. Constatou-se os maiores teores de Se nos grãos de arroz em tratamentos via foliar com a aplicação do mesmo na forma de selenito. Ainda, no mesmo trabalho, os teores de Se nos grãos foram significativamente afetados pela interação entre as formas de Se (selenato e selenito) e concentrações de Se na calda de pulverização foliar, sem adubação de Se via solo, observando-se, assim, a eficácia da biofortificação agronômica com o aumento na concentração de Se nos grãos.

Em relação ao Zn, geralmente menores teores são encontrados em sementes, raízes e tubérculos quando comparado às hortaliças folhosas (WHITE; BROADLEY, 2011). Sabendo-se que 5 % das dietas atuais é constituída de espécies do grupo das brássicas (KUMSSA et al., 2015), e como as brássicas não contém elevadas concentrações de ácido fítico, plantas como

repolho e brócolis contém maior teor de Zn imediatamente biodisponível para alimentação (JOY et al., 2014), sendo que altas concentrações de fitatos nos alimentos impedem a absorção de Ca, Fe, Mg e Zn pelo intestino humano (HURREL; EGLI, 2010). Assim, as hortaliças folhosas são promissoras em estudos de biofortificação de Zn visando reduzir a desnutrição alimentar.

Entretanto, as culturas produtoras de grãos são amplamente cultivadas e consumidas em todo o mundo. O arroz e o trigo são as culturas mais cultivadas no planeta, e quando somadas ao cultivo de milho, chegam a fornecer em torno de 60 % da energia alimentar mundial (LOFTAS; ROSS; BURLES, 1995). Atrelado a isso, no continente sul-americano uma das leguminosas mais importantes na dieta humana é o feijão comum, rico em proteínas (como albuminas e globulinas) e micronutrientes como o Zn (BLAIR, 2013).

Levando em conta a extensa produção e consumo de grãos em todo o mundo, muitos trabalhos com biofortificação vem sendo realizados nessas culturas com os principais elementos deficientes na população humana. Assim, vários trabalhos observaram o aumento nos teores de Zn (CAKMAK et al., 2010; DUARTE et al., 2013; SOUZA et al., 2013b; FIGUEIREDO, 2016; RAM et al., 2016; MOLOTO et al., 2018), Se (RAMOS et al., 2010; 2011; 2012; BOLDRIN et al., 2012), Fe (SOUZA et al., 2013b; OLIVEIRA, 2015; PETRY et al., 2015), I (WHITE; BROADLEY, 2009) e vitamina A (BECHOFF et al., 2017) nos grãos e, ou, nas plantas em diferentes cultivares estudadas. Deve-se atentar que os resultados mostram que a eficiência da biofortificação depende das formas, épocas e doses de aplicação dos nutrientes, da sua interação com outros nutrientes, do tipo de solo e da característica genética de cada cultivar.

Por fim, tem-se consciência de que a biofortificação das culturas agrícolas, especialmente das mais cultivadas, é mais uma estratégia que, aliada com as demais já existentes, atua para diminuir as deficiências nutricionais que atingem grande número de pessoas em todo o mundo. Assim, a biofortificação, aliada com à fortificação durante o processamento industrial, a suplementação e a diversidade na dieta, deve ser levada a sério em cada país, especialmente nos subdesenvolvidos. Não que a biofortificação irá eliminar todas as deficiências nutricionais, mas que facilitará o fornecimento de alimentos mais nutritivos às pessoas mais necessitadas, com uma melhor relação custo-benefício e de forma sustentável (SALTZMAN et al., 2013).

3.2. Zinco no solo e na planta

Como para os animais e humanos, o Zn também é um micronutriente para as plantas. Porém, o acúmulo de Zn nos grãos (produto colhido para alimentação) é considerado baixo nos cereais, e grande parte das vezes, não atende à necessidade que os humanos têm desse elemento. Estima-se que 50 % dos solos cultivados com grãos é deficiente em Zn (RAM et al., 2016); pois, parte do Zn total do solo (30 a 60 % do total) pode estar em forma não disponível, ficando aprisionado na matéria orgânica e adsorvido de forma específica nos coloides minerais (ALONSO et al., 2006).

A dinâmica e disponibilidade de Zn do solo para as plantas são afetados por diferentes fatores inerentes ao solo (granulometria, pH da solução, teor de matéria orgânica, umidade, temperatura, o próprio teor de Zn total e as características químicas, físicas e mineralógicas), à planta (localização das raízes e efeito rizosférico) e aos adubos utilizados no manejo (tipos e forma de aplicação dos adubos, íon acompanhante do Zn e possíveis contaminantes presentes) (HAN et al., 2011; SADEGHZADEH, 2013). Alguns autores citam que o fator mais importante que influencia na disponibilidade de Zn é o pH da solução do solo, sendo que quanto mais básico, menor será a disponibilidade do elemento para as plantas. Outro fator que também contribui para a indução de deficiência de Zn nas plantas é o elevado teor de fósforo (P) disponível, ocasionado pelas elevadas quantidades de P aplicadas na adubação de plantio no Brasil, resultando na precipitação de Zn no solo na forma de fosfato de Zn (ALONSO et al., 2006; ZHAO; SELIM, 2010; BEHERA et al., 2011). Dessa forma, quando a prática da calagem é realizada de forma errada, aplicando-se doses de calcário acima da desejada, associada com as altas doses de P aplicada na adubação de plantio junto ao formulado NPK, observa-se com mais frequência a deficiência de Zn nas culturas agrícolas, especialmente nas mais exigentes (DECHEN; NACHTIGALL, 2007). Em solos arenosos, utilizando sulfato de amônio para diminuir o pH da solução do solo de 7 para 5, observou-se que dobrou a disponibilidade de Zn natural do solo e o absorvido pela planta (SADEGHZADEH, 2013).

Outro fator que está relacionado à deficiência de Zn é o efeito de diluição do micronutriente em condições de alta disponibilidade de P, ocorrido devido ao crescimento excessivo da parte aérea não acompanhada da absorção de Zn pela planta (MARINHO; IGUE, 1972; MARSCHNER, 2012). Alguns autores atribuíram a deficiência de Zn sob altas

concentrações de P ao efeito de diluição (SINGH; KARAMANOS; STEWART, 1988; GIANQUITO et al., 2000; LI et al., 2003).

Pérez-Novo et al. (2011) demonstraram que, em solos ácidos apresentando elevados teores de óxido de Fe e Al na fração argila, o ânion fosfato pode formar complexos com o Zn nas superfícies coloidais, aumentando a adsorção de Zn de forma não disponível para as plantas. Por outro lado, em trabalho realizado com trigo cultivado em solo de textura franca na província de Hebei, China, não houve alteração nos teores de Zn no solo (extraído pelo DTPA) com a aplicação de doses de P no solo, mas as concentrações de Zn nos grãos reduziram conforme as aplicações das maiores doses de P (ZHANG et al., 2012). Assim, observa-se que ainda não é tão clara a interação entre P e Zn em solos.

Sadeghzadeh (2013) cita que a disponibilidade baixa de Zn no solo para a planta acarreta em drásticas perdas de qualidade nutricional dos grãos e rendimento de produção. Nas plantas, os teores de macro e micronutrientes são encontrados de maneira diferente nos tecidos, além de que, difere-se entre as espécies. Geralmente, nas folhas se encontram todos os micronutrientes, ao contrário dos grãos, raízes e tubérculos (tecidos de reserva), que contêm pouca diversidade, geralmente não apresentando padrões suficientes à necessidade humana (BEYER, 2010).

A mobilidade do Zn no floema apresenta certas restrições ao acúmulo do elemento nos tecidos finais (frutas, sementes e tubérculos), diferindo das hortaliças folhosas, que apresentam maiores teores de Zn nas suas partes comestíveis (próprias folhas), sendo que muitas vezes as concentrações de Zn nos tecidos dessas hortaliças folhosas, somente são limitadas por efeitos de fitotoxicidade (WHITE; BROADLEY, 2011).

No metabolismo vegetal, o Zn apresenta papel de destaque na ativação de enzimas, regulação e expressão gênica, síntese de proteína, metabolismo de carboidratos, fotossíntese, atuação de fitohormonios, fertilidade, regulação de crescimento, produção de sementes e na defesa contra doenças (MARSCHNER, 2012). Existem várias funções chave exercidas pelo Zn nas plantas, sendo de fundamental importância para atividades de muitas enzimas (REHMAN et al., 2018). Dentre as seis classes de enzimas (hidrolases, transferases, liases, ligases, isomerases e oxidorredutases), o único metal que atua na atividade de todas é o Zn, demonstrando ainda mais a sua essencialidade dentro do metabolismo vegetal, tais como no metabolismo de proteínas, carboidratos e auxinas, além dos processos reprodutivos (SADEGHZADEH, 2013).

O Zn é fundamental na síntese proteica, isso é devido a sua atuação na função e estabilidade do material genético. Nesse caso, seu papel se torna imprescindível no metabolismo do DNA/RNA, na disposição da cromatina e expressão genética. A decomposição do RNA, a queda na ação da RNA polimerase, a alteração ribossômica e a queda da quantidade de ribossomos, são anormalidades causadas por alterações na síntese proteica, fruto da deficiência de Zn nas plantas (CAKMAK et al., 1989; MARSCHNER, 2012). Além da essencial função na síntese proteica, o Zn atua na síntese do aminoácido triptofano, precursor do ácido indol acético (AIA). Com isso, a deficiência de Zn em plantas geralmente causa diminuição da distância entre os internódios, resultando em menor altura, folhas menores e redução de produtividade (SANTOS et al., 2009; MUNER et al., 2011).

Pelos efeitos impostos na fotossíntese e na conversão do açúcar, o Zn atua no metabolismo dos carboidratos. A diminuição da atividade fotossintética pode ocorrer devido à queda da ação da anidrase carbônica (inibindo a transferência de elétrons fotossintéticos), da ação fotoquímica dos cloroplastos e do conteúdo de clorofila, e também modificações na estrutura do cloroplasto, que podem ser consequências advindas da deficiência de Zn nas plantas (BROADLEY, 2007; KIRKBY; RÖMHELD, 2007; SADEGHZADEH, 2013).

Quando a planta sofre algum estresse causado por insetos e, ou patógenos, ela responde de forma rápida na síntese, principalmente, de ânion superóxido (O^{2-}) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), denominadas espécies reativas de oxigênio (HU et al., 2009). Por outro lado, há uma ampla gama de agentes antioxidantes, sendo uma delas as superóxido dismutases (SOD) (MITTLER, 2002), responsável pela primeira linha de defesa da planta contra os altos níveis tóxicos das espécies reativas de oxigênio, que está ligada a um metal (Cu/Zn, Mn e Fe) conforme localização no interior das células (GILL; TUTEJA, 2010). Assim, com a dismutação do ânion O^{2-}, reduz-se indiretamente a taxa de formação de OH^- a partir de O^{2-} (DINAKAR et al., 2012).

Lipídeos de membrana e grupo sulfidrilas são altamente prejudicados por espécies reativas de oxigênio. Nesse sentido que o Zn tem um papel fisiológico importante, pois, atua na formação e desintoxicação de espécies reativas de oxigênio nas membranas celulares. Por exemplo, quando células de raízes estão deficientes em Zn, causam estresse oxidativo deteriorando esses compostos (lipídeos de membrana e grupos sulfidrilas), ocorrendo maior vazão de compostos orgânicos (carboidratos e aminoácidos) para fora da célula. Por

consequência, o baixo teor de Zn nas plantas as torna mais vulneráveis às doenças de raízes (SADEGHZADEH, 2013).

O Zn é absorvido pelas raízes e transportado para a parte aérea na forma de Zn^{2+}, mas em caso de solos muito básicos (pH alto), a absorção também pode ocorrer na forma de $ZnOH^{+}$, (MALAVOLTA, 2006). Em relação à redistribuição, o Zn é considerado um elemento pouco que é móvel no floema, especialmente em plantas deficientes no elemento, sendo dificilmente encontrado o Zn^{2+} na seiva elaborada (PRADO, 2008). Os teores encontrados de Zn em grande parte das espécies variam de 20 a 120 mg kg^{-1} de matéria seca (MALAVOLTA, 2006), e nos grãos de feijão preto e carioca, ambos secos, observa-se teores médios de 29 mg kg^{-1} (TACO, 2011), variando conforme cultivares.

3.3. Zinco e a nutrição humana

Por fazer parte de uma série de reações químicas essenciais para o metabolismo normal dos mamíferos, o Zn é um nutriente para humanos. Estudos apontam que o Zn, quando ingerido diariamente de forma adequada, reduz a incidência de câncer, distúrbios neurológicos e doenças autoimunes em humanos (SOUZA, 2013a; FIGUEIREDO, 2016). Ainda, o Zn atua na maturação hepática da vitamina A, fertilidade e reprodução de humanos (LEVENSON; MORRIS, 2011; GIBSON, 2012).

Segundo a Joint Health Claims Initiative (JHCI) to the Food Standards Agency (2003), as funções na divisão celular, no desenvolvimento reprodutivo, no sistema imunológico e na restauração de pele e ferimentos são as principais atribuições do Zn na saúde humana. Em corroboração, em 2016 a Canadian Food Inspection Agency (CFIA) atribuiu alegações de que o Zn tem função no sistema imunológico, manutenção da pele em bom estado, na formação de tecidos e metabolismo energético (CFIA, 2018). Essas funções resultam em influência direta no desenvolvimento e crescimento normal, e a manutenção da saúde das pessoas (COMINETTI; REIS; COZZOLINO, 2017).

Deficiências causadas por micronutrientes afetam parte da população mundial, sendo estimado que mais de 2 bilhões de pessoas apresentam alguma deficiência com um ou mais micronutrientes. Dentre essas, o número das que estão em perigo de deficiência de Zn fica perto de 1,1 bilhão de pessoas, e em torno de 90 % deste valor está situado no continente asiático e africano (KUMSSA et al., 2015). O baixo teor de Zn em humanos foi listado como quinto maior

fator de doenças e morte em países em desenvolvimento (SHAHZAD; ROUACHED; RAKHA, 2014).

Os casos de deficiência de Zn são relatados em todo mundo, tendo destaque nos países em desenvolvimento (CAKMAK, 2008), afetando muitas crianças com menos de cinco anos, estimando-se uma mortalidade de quase 450.000 crianças em 2004 por essa deficiência (BLACK et al., 2008). Sintomas da deficiência de Zn se expressam em crianças como retardo no crescimento, anorexia e hipogeusia (BROWN et al., 2002); e em adultos, na forma de doenças crônicas e complicações na gravidez (PRASAD, 2001; MORI et al., 2012). Sabendo-se que a deficiência de Zn em humanos está diretamente ligada a problemas de saúde, essa deficiência resulta em menor crescimento físico de pessoas, ineficiência do sistema imunológico e menor eficácia no aprendizado, elevando assim, riscos de infecções, alterações no DNA e evolução de câncer (LEVENSON; MORRIS, 2011).

Devido à ingestão de outras substâncias e outros elementos na alimentação, a biodisponibilidade de Zn pode diminuir dentro do organismo; por isso há uma dificuldade em determinar a necessidade diária de Zn em humanos. No Reino Unido, segundo estudos sobre Zn, a referência de ingestão diária (em inglês, *Reference Nutrient Intake* – RDI) desse elemento em adultos, para mulheres é de 7,0 mg dia^{-1}, e para homens é de 9,5 mg dia^{-1}. A Administração de Alimentos e Medicamentos dos Estados Unidos (em inglês, *Food and Drug Administration* – FDA) cita como limite tolerável de ingestão em adultos a dose de 40 mg dia^{-1}, já que o Zn ingerido em excesso pode causar uma série de distúrbios ao organismo (LIVINGSTONE, 2015).

3.4. A cultura do feijoeiro-comum

O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) representa quase metade das leguminosas consumidas no mundo, evidenciando sua importância na dieta humana. Especialmente na África e na América Latina, o grão de feijão é imprescindível na dieta básica da população (BROUGHTON et al., 2003; BLAIR, 2013), se tornando fonte destaque de nutrientes para aproximadamente 300 milhões de pessoas, sendo fonte de 65 % das proteínas necessárias, 32 % da energia (WELCH et al., 2000; BLAIR et al., 2010) e uma excelente fonte de micronutrientes (BROUGHTON et al., 2003).

O feijão merece suma importância na alimentação brasileira por ser tradicionalmente utilizado na culinária. Além de que é uma importante fonte de proteínas, aceitável de carboidrato, vitaminas (principalmente as do complexo B), minerais como Fe, cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P) e Zn, fibras e compostos fenólicos que podem reduzir a ocorrência de doenças. Assim, enquanto fator de combate à desnutrição e segurança alimentar, é apontado como item indispensável das cestas básicas na alimentação dos brasileiros (SILVA; ROCHA; CANNIATTI, 2009; BORÉM; CARNEIRO, 2015; MOURA; BRITO, 2015).

Em trabalho realizado por Souza et al. (2013c), demonstram-se resultados referentes ao consumo alimentar dos brasileiros, conforme faixa etária, sexo, região e renda familiar *per capita*, sendo que sexo e faixa etária foram os itens que obtiveram a menor variação quanto aos itens analisados. Nesse trabalho, demonstrou-se que, em geral, os cinco alimentos mais preferidos ao consumo do dia a dia pela população brasileira: 84 % citam o arroz, 79 % o café, 72,8 % o feijão, 63 % o pão de sal e 48 % a carne bovina. Assim, conseguimos observar a relevância do feijão na alimentação da população brasileira, e a importância da biofortificação dos grãos dessa cultura, sendo uma das ferramentas na luta contra a desnutrição alimentar.

O teor de proteína na maioria das cultivares de feijão no Brasil está em torno de 20 a 25 %. Dos aminoácidos essenciais aos humanos, as proteínas do feijão são abundantes em lisina, mas deficiente nos aminoácidos sulfurados metionina e cisteína. Devido a isso, o tradicional prato brasileiro, arroz com feijão, torna a ingestão de aminoácidos eficiente, pois os cereais são ricos em aminoácidos sulfurados e pobres em lisina (BORÉM; CARNEIRO, 2015). Porém, as variações climáticas, localização geográfica e condições como tipo de solo, pH, fertilidade, textura, matéria orgânica, entre outras, faz com que a composição química dos grãos apresenta grande variação (RIBEIRO, 2010).

A estimativa de consumo de grãos de feijão na África e na América Latina supera 500 milhões de pessoas (CORTÉS et al., 2013). No Brasil, a estimativa de consumo diário está em torno de 50 g pessoa^{-1} de grãos de feijão seco, uma média anual de aproximadamente 18 kg pessoa^{-1} ano^{-1}, destacando o país como um grande consumidor, além de ser um dos maiores produtores do grão (AGRIANUAL, 2015; IBGE, 2011).

Dentre as leguminosas, a cultura do feijoeiro é considerada a de maior importância na alimentação humana do mundo, especialmente da população de baixa renda. O comércio externo entre países é baixo, pois a grande maioria da produção é para o consumo interno (LOLLATO; SEPUCRI; DEMARCHI, 2001). Segundo a FAO, a produção total de feijão foi

de aproximadamente 27 milhões de toneladas no ano de 2016, sendo os três maiores produtores Mianmar, Índia e Brasil. O Brasil, no mesmo ano, apresentou uma produção média de 2,6 milhões de toneladas (FAO, 2018). Assim, observa-se o destaque mundial do país na produção desse grão e, por ser um alimento saudável e nutritivo, se torna importante para a alimentação dos brasileiros. No Estado do Paraná, o estado que mais produz feijão no país, a produção de grãos de feijão chegou a quase 590 mil toneladas na safra 2017/2018 (CONAB, 2018).

No Brasil, o cultivo de feijão pode ocorrer em até três safras durante o ano, variando conforme a região. Quando semeado entre os meses de agosto e novembro é conhecido como safra das "águas" ou 1ª safra; quando semeado entre os meses de dezembro a março é conhecido como safra das "secas" ou 2ª safra; e quando semeado entre abril e julho é conhecido como safra de inverno, ou safra irrigada ou 3ª safra (SILVA; WANDER, 2013), demonstrando a ampla adaptabilidade durante o ano e conforme as condições edafoclimáticas de cada região.

O ciclo da cultura do feijoeiro pode variar conforme as cultivares e sofrer influencia devido às condições climáticas, apresentando assim de 70 a 110 dias de ciclo. As principais características morfológicas durante as fases vegetativa e reprodutiva da cultura se encontram na Tabela 1 (QUINTELA et al., 2005).

Tabela 1. Etapas do desenvolvimento da planta de feijoeiro-comum.

Etapas	Descrição*
V0	Germinação: absorção de água pela semente, emergência da radícula e sua transformação em raiz primária.
V1	Emergência: os cotilédones aparecem ao nível do solo e começam a separar-se. O epicótilo começa seu desenvolvimento.
V2	Folhas primárias: folhas primárias completamente abertas.
V3	Primeira folha trifoliolada: abertura da primeira folha trifoliolada e o aparecimento da segunda folha trifoliolada.
V4	Terceira folha trifoliolada: abertura da terceira folha trifoliolada, as gemas e os nós inferiores produzem ramas.
R5	Pré-floração: aparece o primeiro botão floral e o primeiro rácemo.
R6	Floração: abre-se a primeira flor.
R7	Formação das vagens: aparece a primeira vagem.
R8	Enchimento das vagens: começa o enchimento da primeira vagem (crescimento das sementes). Ao final desta etapa, as sementes perdem a cor verde e começam a mostrar as características da cultivar. Inicia-se o desfolhamento.
R9	Maturação fisiológica: as vagens perdem a pigmentação e começam a secar. As sementes adquirem a coloração típica da cultivar.

V: vegetativo; R: reprodutivo
*: Cada etapa inicia-se quando 50 % das plantas mostram as condições que correspondem à descrição da etapa.
Fonte: QUINTELA et al., 2005.

Há uma grande variedade de grupos comerciais de feijão no Brasil, como carioca, preto, rosinha, roxo entre outras; isso se dá devido à ampla diversidade de preferência dos consumidores (PEREIRA et al., 2012). Entretanto, o mercado consumidor brasileiro tem preferência de aproximadamente 70 % para o feijão do tipo carioca e de 20 % para o do tipo preto (DEL PELOSO; MELO, 2005; BRASIL, 2008).

A aceitação de feijão do grupo carioca no Brasil é praticamente geral, além de ser bem comercializado. Já o feijão do grupo preto é característico de cada estado, sendo mais aceito e comercializado no Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Rio de Janeiro, e também em parte do Paraná, sudeste de Minas Gerais e sul do Espírito Santo; porém, nos demais estados, apresenta pouca aceitação e valor comercial. E de maneira geral, o brasileiro prefere sementes de forma pequenas e opacas de feijão (GUEVARA, 1990; DEL PELOSO; MELO, 2005; BORÉM; CARNEIRO, 2015). Deve-se levar em consideração que o cultivo e manejo da cultura é similar entre os dois grupos.

Em trabalho realizado por Ribeiro et al. (2008) foram analisadas 19 cultivares de feijão, verificando-se que o Zn foi o micronutriente (considerando Fe, Zn, Cu, Mn e B) encontrado em segundo maior teor no grão, cerca de 30 mg kg^{-1}. A Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO, 2011) apresenta os teores de nutrientes das mais diversas culturas, sendo levado em consideração por muitos nutricionistas brasileiros para elaboração de cardápios visando a adequada alimentação da população brasileira. A Tabela 2 contém a composição nutricional média dos grãos de feijão preto e carioca cru (TACO, 2011).

Tabela 2. Composição nutricional em 100 g de grãos (cru) de feijão preto e carioca.

Feijão [1]	**Proteína**	**Carboidrato**	**P**	**K**	**Ca**	**Mg**	**Fe**	**Mn**	**Cu**	**Zn**
	----------g----------		----------mg----------							
Carioca	20,0	61,2	385,0	1352,0	123,0	210,0	8,0	1,0	0,8	2,9
Preto	21,3	58,8	471,0	1416,0	111,0	188,0	6,5	1,3	0,8	2,9

[1] Fonte: Adaptado da Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO, 2011).

O consumo de feijão é relatado por pesquisadores como benéfico à saúde humana (JENKINS et al., 2012; CAMPOS-VEGA et al., 2013). Levando em conta esses benefícios já existentes no consumo de grãos de feijão, que vem se demonstrando muito eficazes na melhora da qualidade alimentar, pode-se concluir que o feijão comum se mostra uma importante cultura para se levar em consideração nos estudos com biofortificação agronômica.

3.5. Propriedades nutricionais dos grãos de feijoeiro-comum

3.5.1. Proteínas de reserva e aminoácidos

Plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) apresentam cerca de 20 a 25 % de teor de proteínas (BORÉM; CARNEIRO, 2015). A qualidade fisiológica das sementes está diretamente relacionada ao seu teor de proteínas, ou seja, maior teor proteico nas sementes favorece o início de desenvolvimento das plantas (HENNING et al., 2010).

Nas sementes, existem dois tipos de proteínas: as metabólicas, que desempenham atividade celular, e as de reserva, que são sintetizadas somente durante o desenvolvimento da semente (SAWAZAKI et al., 1985). As proteínas de reserva constituem cerca de 80 % do total de proteínas das sementes do feijoeiro-comum, como em outras leguminosas (DURANTI; GIUS, 1997). Dentre as proteínas de reserva, nos grãos de feijão destacam-se cerca de 40 a 60 % de globulinas, 20 a 30 % de glutelinas, 20 % de albuminas e, em menor concentração, 2 a 4 % de prolaminas (FREITAS; TEIXEIRA; FERREIRA, 2004; NEVES; SILVA; DA SILVA, 2006; MONTOYA et al., 2010).

A globulina é a proteína de reserva que age na própria reserva da semente. A albumina tem função essencial na constituição de enzimas, além de ser constituída de importantes aminoácidos sulfurados para a nutrição humana. (PARK; KIM; BAIK, 2010). É do grupo das globulinas, a proteína que se encontra em maior teor no grão de feijão, a faseolina (DERBYSHIRE; WRIGHT; BOULTER, 1976). As glutelinas e prolaminas são proteínas encontradas somente em vegetais. As glutelinas geralmente estão ligadas às estruturas dos tecidos, fazendo parte dos principais componentes de proteínas sem atividade nas sementes (MARCOS-FILHO, 2015). A prolamina tem funções semelhantes, compondo membranas celulares e organelas (PIRES, 2002).

Na caracterização dos aminoácidos totais encontrados nas proteínas do grão de feijão, destaca-se em elevada concentração a lisina, porém, o grão é pobre nos aminoácidos sulfurados cistina e metionina (MOURA; CANNIATTI-BRAZACA, 2006) e no aminoácido triptofano (YIN et al., 2010).

A digestibilidade das proteínas ocorre por meio da quebra de suas moléculas por enzimas digestivas até que sejam liberadas as cadeias de aminoácidos, que serão assimilados pelo organismo (MENDES et al., 2007). Assim, a capacidade de digestibilidade da proteína, o

teor de aminoácidos essenciais presente, e sua biodisponibilidade ao organismo determinam o valor nutricional de uma proteína (CARBONARO et al., 2000).

Embora o grão de feijão seja conhecido por ter elevado teor proteico, suas proteínas não apresentam boa biodisponibilidade e possuem baixa concentração de aminoácidos sulfurados, reduzindo seu valor nutricional. Ainda, as proteínas do grão de feijão são consideradas de menor digestibilidade que aquelas encontradas nos grãos de cereais (LOPES JÚNIOR, 2008). É o caso da faseolina, representando 40 a 50 % do total das proteínas do grão de feijão, que não apresenta grande valor nutritivo devido à elevada resistência à quebra enzimática e ao baixo teor de aminoácidos sulfurados (MONTOYA et al., 2008). Porém, o valor nutritivo se eleva quando as proteínas de feijão são expostas a processos térmicos, como o calor úmido (DA SILVA et al., 2006).

3.5.2. Açúcares totais e sacarose

Os açúcares solúveis são resultantes primários da fotossíntese, em especial a sacarose, sendo fundamentais para o desenvolvimento e crescimento das plantas (SMEEKENS, 2000).

Alguns fatores, internos e externos, podem influenciar nos teores de açúcares totais presentes nas folhas e grãos das plantas, devido às alterações no metabolismo, suprimento de carboidratos, ou até mesmo pelo crescimento das diferentes partes da planta, diluindo os teores de açúcares (QUILOT et al., 2004). Vários autores citam que o feijão apresenta teor de açúcar solúvel de 3,8 a 6,5 % de massa seca (MS), sendo encontrado até teor de 9,0 % de MS (SAWAZAKI et al., 1985; KOZLOWSKA, 2001; RODIÑO et al., 2001; RODIÑO et al., 2003; ALTAMIRANO-HERNÁNDEZ et al., 2007). Nas sementes em geral, o teor de açúcar solúvel varia entre 2,0 e 9,6 g 100 g^{-1} de MS (KOZLOWSKA, 2001); sendo que este é diminuído na deterioração das sementes com o tempo (MARCOS FILHO, 2005).

A sacarose é formada por uma molécula de glucose e uma molécula de frutose, sendo o oligossacarídeo (polímero composto de 2 a 10 monossacarídeos) mais importante, por ser encontrado em grande quantidade na natureza e apresentar grande relevância na alimentação humana (BOBBIO; BOBBIO, 2003). O teor de sacarose encontrado nas sementes de leguminosas está entre 0,3 e 2,9 % do peso da semente, porém, outras espécies vegetais apresentam teores mais elevados em outras partes da planta, ficando entre 15,0 e 20,0 % (SIMPSON; OGORZALY, 2001).

3.6. Biofortificação com zinco na cultura do feijoeiro-comum

A possibilidade de maior sucesso nos programas de biofortificação está ligada diretamente à escolha de culturas agrícolas que sejam amplamente consumidas pela população. A cultura do feijoeiro-comum se destaca em relação ao consumo de seus grãos no Brasil, além de ser uma importante fonte de proteína para a população de baixa renda do Terceiro Mundo (BLAIR, 2013; RAM et al., 2016).

Figueiredo (2016) observou que as aplicações de Zn no solo (via sulco de semeadura, dose de 4 kg ha^{-1}) e posteriormente nas folhas, em quatro cultivares de feijão-comum do grupo carioca, proporcionaram um acréscimo médio de 22,2 % em teor de Zn nos grãos das cultivares estudadas, fornecendo cerca de 27,0 % da média de ingestão diária de Zn recomendada para adultos. Entretanto, em tratamentos sem aplicação de Zn em uma das cultivares analisadas, o autor verificou o maior teor de Fe (micronutriente que também causa desnutrição em humanos), sendo de 79,01 mg kg^{-1}, demonstrando uma forma de antagonismo entre os elementos quanto ao acúmulo nos grãos.

Em trabalho realizado por Ram et al. (2016), por meio de resultados obtidos em sete diferentes países, observaram-se que a aplicação foliar de Zn, atrelada à aplicação de agroquímicos, nas culturas do trigo, arroz e feijão visando a biofortificação, se mostrou eficiente. Quando o elemento foi aplicado sozinho via foliar, o teor médio de Zn nos grãos do feijoeiro aumentou de 68 para 78 mg kg^{-1}, e quando a aplicação foi combinada com algum agroquímicos, houve acréscimo de 68 para 77 mg kg^{-1}. Assim, os autores concluíram que a aplicação foliar de Zn combinada com 14 tipos de fungicidas e inseticidas utilizados nos experimentos pode ser uma forma de manejo eficaz, tanto no combate a doenças e pragas, quanto no ganho nutricional nas partes comestíveis dos alimentos.

Cambraia (2015) estudou a biofortificação de feijão comum utilizando duas cultivares promissoras no acúmulo de Zn nos grãos, testando as doses de 0, 120, 240, 480, 720 e 1200 g ha^{-1} de Zn na forma de $ZnSO_4.7H_2O$ aplicados via foliar, em três diferentes estágios fenológicos da cultura: V5, R7 e R8. Os resultados obtidos demonstraram um aumento de 14,8 mg kg^{-1} para 21,1mg kg^{-1} quando utilizada a maior dose, de 1200 g ha^{-1}. Mas, mesmo tendo aumentado a concentração de Zn nos grãos, as duas cultivares utilizadas não alcançaram os teores de Zn que outras cultivares utilizadas no melhoramento genético demonstram alcançar.

Moloto et al. (2018) descreveram que a deficiência de Zn no plasma sanguíneo em sul-africanos é alta, e isso se dá principalmente pelo fato de a dieta da população de baixa renda ser pobre nesse micronutriente. Nesta região já foi utilizada, como alternativa para reduzir essa deficiência, a técnica da fortificação de trigo e farelo de milho, mas não se obteve sucesso, pelo fato de produtos fortificados apresentarem um alto custo, ficando esses produtos aquém da população de baixa renda. Sendo assim, uma estratégia alternativa proposta é a biofortificação de feijão comum com Zn, principalmente das cultivares mais utilizada na região. Além disso, a estratégia propõe a adoção de feijão comum de origem andina para cultivo na região, principalmente os biofortificados e os mais responsivos à biofortificação.

3.7. Referências Bibliográficas

AGRIANUAL – Anuário da Agricultura Brasileira. **Feijão**. São Paulo: FNP, 2015.

ALLOWAY, B. J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. **Environmental Geochemistry and Health**, Oxford, v. 31, n. 5, p. 537-548, 2009.

ALONSO, F. P. et al. Agronomic implications of the supply of lime and gypsium by-products to palexerults from western spain. **Soil Science**, v. 171, n. 1, p. 65-81, 2006.

ALTAMIRANO-HERNÁNDEZ, J. et al. Influence of soluble sugars on seed quality in nodulated common bean (*Phaseolus vulgaris* L.): the case of trehalose. **Crop Science**, v. 47, p. 1193-1205, 2007.

AMARANTE, L.; LIMA, J. D.; SODEK, L. Growth and stress conditions cause similar changes in xylem amino acids for diferente legume species. **Evironmental and Experimental Botany**, v. 58, p. 123-129, 2006.

AMARANTE, L.; SODEK, L. Waterlogging effect on xylem sap glutamine of nodulated soybean. **Biologia Plantarum**, v. 50, p. 405-410, 2006.

BECHOFF, A. et al. Micronutrient (provitamin A and iron/zinc) retention in biofortified crops, **African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development,** vol. 17, n. 02, p. 11893-11904, abr. 2017.

BEHERA, S. K. et al. Distribuition variability of total and extractable zinc in cultivated acid soils of India and their relationship with some selected soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 162, n. 3, p. 242-250, Maio, 2011.

BEYER, P. Golden rice and 'Golden' crops for human nutrition. **New Biotechnology**, Oxford, v. 27, n. 5, p. 478-481, 2010.

BLACK, R. E. et al. Maternal and child undernutrition: global and regional exposures and health consequences. **Lancet**, v. 371, p. 243–260, 2008.

BLAIR, M. et al. Genetic diversity, inter-gene pool introgression and nutritional quality of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) from central africa. ***Theoretical* and Applied *Genetics***, v. 121, p. 237–248, 2010.

BLAIR, M. W. Mineral biofortification strategies for food staples: the example of common bean. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 35, p. 8287-8294, 2013.

BOBBIO, F. O.; BOBBIO, P. **Introdução à química de alimentos**. 2ª ed. São Paulo: Livraria Varela, 2003. 223p.

BOLDRIN, P. F. et al. Selenato e selenito na produção e biofortificação agronômica com selênio em arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 6, p. 831-837, 2012.

BORÉM, A.; CARNEIRO, J. E. S. A Cultura. In: CARNEIRO, J. E.; PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão**: do plantio a colheita. Viçosa – MG: Editora UFV, 2015. A Cultura, p. 09-15.

BOUIS, H. E. et al. Biofortification: a new tool to reduce micronutrient malnutrition. **Food and Nutrition Bulletin**, Davis, v. 32, n. 1, p. 31-40, Mar. 2011.

BOUIS, H. E. Reducing Mineral and Vitamin Deficiencies through Biofortification: Progress Under HarvestPlus. **In: Hidden Hunger: Strategies to Improve Nutrition Quality**. Karger Publishers, 2018. p. 112-122.

BOUIS, H. E.; WELCH, R. M. Biofortification - A sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south. **Crop Science**, Madison, v. 50, n. 1, p. 20-32, Mar. 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa nº 12, de 28 de março de 2008. Regulamento técnico do feijão. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 31 mar. 2008. Seção 1.

BROADLEY, M. R. et al. Zinc in plants, **New Phytologist**, v. 173, nº 4, p. 677–702, mar. 2007.

BROUGHTON, W. J. et al. Beans (*Phaseolus* spp.)-model food legumes. **Plant Soil**, v. 252, p. 55–128, 2003.

BROWN, K.H. et al. Effect of supplemental zinc on the growth and serum zinc concentrations of prepubertal children: A meta-analysis of randomized controlled trials, ***The* American Journal *of* Clinical Nutrition**, v. 75, p. 1062–1071, 2002.

CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? **Plant Soil**, v. 302, p. 1–17, 2008.

CAKMAK, I. et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 58, n. 16, p. 9092-9102, Aug. 2010.

CAKMAK, I., MARSCHNER, H., BANGERTH, F. Effect of zinc nutritional status on growth, protein metabolism and levels of indole-3-acetic acid and other phytohormones in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Experimental Botany**, v. 40, p. 405-412, 1989.

CAMBRAIA, T. L. L. **BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO FEIJÃO PELO MANEJO DA ADUBAÇÃO COM Zn.** 2015. 49 p. Dissertação (Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2015.

CAMPBELL, W. H. Nitrate reductase structure function and regulation on bridging to gap between biochemistry and physiology. **Annual Review of Plant Physiology**., Los Angeles, v. 50, p. 277-303, 1999.

CAMPOS-VEGA, R. et al. Common beans and their non-digestible fraction: cancer inhibitory activity - an overview. **Foods**, Basel, v. 2, n. 3, p. 374-392, Aug. 2013.

CARBONARO, M. et al. Perspectives into factors limiting in vivo digestion of legume proteins: Antinutritional compounds or storage proteins? **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 48, p. 742-749, 2000.

CFIA (Canadian Food Inspection Agency). Guidance Document Repository (GDR). Food Labelling for Industry. Health Claims. Nutrient Function Claims. <http://www.inspection.gc.ca/food/labelling/food-labelling-for-industry/health-claims/eng/1392834838383/1392834887794?chap=9#s16c9>. Acesso em 04/09/2018.

COELHO, A. M. et al. Balanço de nitrogênio (15N) em um latossolo vermelho-escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 15, p. 187-193, 1991.

COMINETTI, C.; REIS, B. Z.; COZZOLINO, S. M. F. Funções Plenamente Reconhecidas de Nutrientes – Zinco**. ILSI BRASIL – International Life Sciences Institute do Brasil**. vol. 7, p. 36, 2017.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/infoagro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/21709_4d6f8550138ed03890d0bba9f9db1675>. Acesso em: 24 ago. 2018.

CORTÉS, A. J. et al. Drought tolerance in wild plant populations: the case of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **PLOS ONE**, v. 8, n. 5, p. 1-10, 2013.

DA SILVA, C. O. et al. Caracterização nutricional de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) após processamento térmico. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 53, n. 309, p. 528-538, set/out., 2006.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa – MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2007. Elementos requeridos à nutrição de plantas, p. 91-132.

DEL PELOSO, M. J.; MELO, L. C. **Potencial de rendimento da cultura do feijoeiro-comum**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005. 131 p.

DERBYSHIRE, E.; WRIGHT, D. J.; BOULTER, D. Legumin and vacilin, storage proteins of legume seeds. **Phytochemistry**, Oxford, v. 15, p. 3-24, 1976.

DINAKAR, C. et al. Photosynthesis in desiccation tolerant plants: energy metabolism and antioxidative stress defense. **Plant Science**, v. 182, p. 29-41, 2012.

DUARTE, R. F. et al. Rice fortified with zinc through parboiled process. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, Amsterdam, v. 27, p. 24-24, 2013.

DURANTI, M; GIUS, C. Legume seeds: protein contente and antinutritional value. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 53, p. 31-45, 1997.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – Statistics division - FAOSTAT. 2016. **Crop Production data**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em 24 ago. 2018.

FIGUEIREDO, M. A. de. **Biofortificação com zinco, selênio e ferro, e biodisponibilidade de ferro em cultivares de feijoeiro-comum**. 2016. 136 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras.

FREITAS, R. L.; TEIXEIRA, A. R.; FERREIRA, R. B. Characterization of the proteins from *Vigna unguiculata* seeds. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 52, p. 1682-1687, 2004.

GIANQUINTO, G.; RAYYAN, A. A.; TOLA, L. D.; PICCOTINO, D.; PEZZAROSSA, B. Interaction effects of phosphorus and zinc on photosynthesis, growth and Yield of dwarf bean grown in two environments. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 220, n. 1-2, p. 219-228, 2000.

GIBSON, R. Zinc deficiency and human health: etiology, health consequences, and future solutions. **Plant Soil**, Netherlands, v. 361, p. 291-299, mar. 2012.

GIL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, p. 909-930, 2010.

GRAHAM, R. et al. Nutritious subsistence food systems. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 92, p. 1-74, 2007.

GUEVARA, L. L. V. **Comportamento físico-sensorial de novas cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) armazenados em condições ambientais. Lavras**. 1990. 132p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Escola Superior de Agricultura de Lavras. 1990.

HAN, X. et al. Zinc fractions and availability to soybeans in represent soils of Northeast China. **Journal Soils & Sediements**, v. 11, p. 596-606, 2011.

HENNING, F. A. et al. Composição química e mobilização de reservas em sementes de soja de alto e baixo vigor. **Bragantia**, v.69, n.3, p.727-734, 2010.

HU, Z.; SHEN, Y.; SHEN, F.; SU, X. Effects of feeding *Clostera anachoreta* on hydrogen peroxide accumulation and activities of peroxidase, catalase, and ascorbate peroxidase in *Populus simonii* x *P. pyramidalis* 'Opera 8277' leaves. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 31, p. 995-1002, 2009.

HURRELL, R.; EGLI, I. Iron biovailability and dietary reference values. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 91, n. 5, p. 1461-1467, maio 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa de orçamentos familiares 2008-2009**: análise do consumo alimentar pessoal no Brasil / IBGE, Coordenação de Trabalho e Rendimento - Rio de Janeiro: IBGE, 2011. p. 150.

JENKINS, D. J. A. et al. Effect of legumes as part of a low glycemic index diet on glycemic control and cardiovascular risk factors in type 2 diabetes mellitus. **Archives of Internal Medicine**, Chicago, v. 172, n. 21, p. 1653-1660, Nov. 2012.
Joint Health Claims Initiative to the Food Standards Agency. **Final Technical Report**, p. 34-44, 2003.

JOY, E. J. M. et al. Dietary mineral supplies in Africa. **Physiologia Plantarum**. v. 151, p. 208–229, 2014.

KIRKBY, E. A.; RÖMHELD, V. Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. **International Plant Nutrition Institute**: Encarte Técnico, n. 118, p. 1-24, junho 2007.

KOZLOWSKA, H. Nutrition. In: HEDLEY, C. L. **Carbohydrates in Grain Legume Seeds**. CAB International, 2001. p. 61-67.

KUMSSA, D. B. et al. Dietary calcium and zinc deficiency risks are decreasing but remain prevalente. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, set. 2015.

LEVENSON, C. W. MORRIS, D. Zinc and neurogenesis: making new neurons from nevelopment to adulthood. **American Society of Nutrition**, Bethesda, v. 2, p. 96-100, 2011.

LI, H. Y.; ZHU, Y. G.; SMITH, S. E.; SMITH, F. A. Phosphorus- zinc interactions in two barley cultivars differing in phosphorus and zinc efficiencies. **Journal of Plant Nutrition**, New Yok, v. 26, n. 5, p. 1085-1099, 2003.

LIVINGSTONE C. Zinc: Physiology, Deficiency, and Parenteral Nutrition, **Nutrition in Clinical Practice**, vol. 30, nº 3, p. 371–382, jun. 2015.

LOFTAS, T.; ROSS, J.; BURLES, D. Dimensions of need: an atlas of food and agriculture. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, Rome, 1995.

LOLLATO, M. A.; SEPUCRI, O.; DEMARCHI, M. Cadeia produtiva do feijão diagnóstico e demandas atuais. Londrina: **Iapar**, 2011. 48p. (Iapar. Documento, 25).

LOPES JÚNIOR, C. O. **Extração protéica e obtenção de hidrolisados protéicos de feijão com baixo teor de fenilalanina.** 2008. 81p. Dissertação (Ciência de Alimentos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Fealq, Piracicaba, 2005.

MARCOS-FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas.** Londrina: Abrates, 2015. 659 p.

MARINHO, M. L.; IGUE, K. Factors affecting zinc absorption by corn from volcanic ash soils. **Agronomy Journal**, v.64, p.3-8, 1972.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. **Academic Press**, 3ª Ed. London, 2012. 651p.

MENDES, F. Q. et al. Digestibilidade protéica e caracterização bromatológica de linhagens de soja com ausência ou presença do inibidor de tripsina Kunitz e das isozimas lipoxigenases. **Bioscence Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 1, p. 14-21, jan/mar. 2007.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 7, p. 405-410, 2002.

MOLOTO, R. M. et al. Biofortification of common bean as a complementary approach to addressing zinc deficiency in South Africans, **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, vol. 68, nº 7, p. 575–584, out. 2018.

MONTOYA, C. A. et al. Phaseolin diversity as a possible strategy to improve nutritional value of common beans (*Phaseolus vulgaris*). **Food Research International**, Essex, v. 43, p. 443-449, 2010.

MONTOYA, C. A. et al. Susceptibility of phaseolin to in vitro proteolusis is highly variable across common bean varieties (*Phaseolus vulgaris*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 56, p. 2183-2191, 2008.

MORAES, M. F. et al. Biofortificação - alternativa à segurança nutricional. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 140, p. 9-15, 2012.

MORI, R. et al. Zinc supplementation for improving pregnancy and infant outcome. **Cochrane Database of Systematic Reviews**, Edição 7, 2012.

MOURA, A. D.; BRITO, L. M. Aspectos Socioeconômicos. In: CARNEIRO, J. E.; PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão**: do plantio a colheita. Viçosa – MG: Editora UFV, 2015. Aspectos Socioeconômicos, p. 16-36.

MOURA, N. C.; CANNIATTI-BRAZACA, S. G. Avaliação de disponibilidade de ferro de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) em comparação com carne bovina. **Ciência e Tecnologia de Alimentos.** Campinas, v. 26, n. 2, p. 270-276, jun. 2006.

MUNER, L. H. et al. Disponibilidade de zinco para o milho em resposta à localização de fósforo no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 1, p. 29-36, Jan 2011.

NEVES, V. A.; SILVA JR, S. I.; DA SILVA, M. A. Isolamento da globulina majoritária, digestibilidade *in vivo* e *in vitro* das proteínas do tremoço_doce (*Lupinus albus* L.), var. multolupa. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 26, n. 4, p. 832-840, 2006.

OLIVEIRA, K. S. **Biofortificação de arroz (*Oryza sativa* L.) em selénio e implicações na composição nutricional**. 2016. 209 p. Dissertação (Qualidade Alimentar) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2016.

OLIVEIRA, N. P. **Variação genotípica envolvendo Fe, Zn e fitatos em soja visando a biofortificação.** 2015. 78p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

PARK, S. J.; KIM T. W.; BAIK B-K. Relationship between proportion and composition of albumins, and *in vitro* protein digestibility of raw and cooked pea seeds (*Pisum sativum* L.) **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Londres, v. 90, p. 1719-1725, 2010.

PEREIRA, H. S. et al. Environmental influence in common bean cultivars grown in Brazilian savannah with low altitude. **Bragantia**, v. 71, n. 2, p. 165-172, 2012.

PÉREZ-NOVO, C. et al. Zinc adsorption in acid soils, **Geoderma**, vol. 162, n. 3–4, p. 358–364, Maio 2011.

PETRY, N. et al. Review: The potential of the common bean (*Phaseolus vulgaris*) as a vehicle for iron biofortification. **Nutrients**, v. 7, n. 2, p. 1144-1173, 2015.

PIRES, C. V. **Caracterização bromatológica e digestibilidade *in vitro* de proteínas de cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.).** 2002. 80p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

PRADO, R. M. **Nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 407p.

PRASAD, A. S. Discovery of human zinc deficiency: Impact on human health. **Nutrition**, v. 17, p. 685–687, 2001.

QUILOT, B. et al. Analysis of genotypic variation in fruit flesh total sugar content via an ecophysiological model applied to peach. **Theory Applyed for Genetic**, Berlim, v. 109, n. 2, p. 440-449, 2004.

QUINTELA, E. D. et al. **Manejo Fitossanitario do Feijoeiro**. Santo Antonio de Goiás: Embrapa Feijão e Arroz, 2005. 16 p. (Embrapa Arroz e Feijão, Circular Técnica 73).

RAM, H. et al. Biofortification of wheat, rice and common bean by applying foliar zinc fertilizer along with pesticides in seven countries. **Plant and soil**, v. 403, n. 1-2, p. 389-401, 2016.

RAMOS, S. J. et al. Response of brachiaria grass to selenium forms applied in a tropical soil. **Plant, Soil and Environment**, v. 58, n. 11, p. 521-527, 2012.

RAMOS, S. J. et al. Selenium accumulation in lettuce germplasm. **Planta**, v. 233, n. 4, p. 649–660, 2011.

RAMOS, S. J. et al. Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite. **Plant, Soil and Environment**, v. 56, n. 12, p. 584–588, 2010.

REHMAN, A. et al. Zinc nutrition in wheat-based cropping systems, **Plant and Soil**, vol. 422, n. 1–2, p. 283–315, jan. 2018.

RIBEIRO, N. D. et al. Composição de microminerais em cultivares de feijão e aplicações para o melhoramento genético, **Bragantia,** vol. 67, n. 2, p. 267-273, 2008.

RIBEIRO, N. D. Potencial de aumento da qualidade nutricional do feijão por melhoramento genético. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 4, p. 1367-1376, 2010.

RODIÑO, A. P. et al. A core collection of common bean from the Iberian peninsula. **Euphytica**, v. 131, p. 165-175, 2003.

RODIÑO, A. P. et al. Diversity of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) germplasm from Portugal. **Genetic *Resourches* and *Crop* Evolution**, v. 48, p. 409-417, 2001.

SADEGHZADEH, B. A review of zinc nutrition and plant breeding. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition.** vol. 13, p. 905-927, 2013.

SALTZMAN, A. et al. Biofortification: progress toward a more nourishing future. **Global Food Security**, Lincoln, v. 2, p. 9-17, 2013.

SANTOS, H. C. et al. Cu e Zn na cultura do sorgo cultivado em três classes de solos. I Crescimento vegetativo e produção. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 2, p. 125-130, Mar 2009.

SAWAZAKI, H. E. et al. Modificações bioquímicas e físicas em grãos de feijão durante o armazenamento. **Bragantia**, v. 44, n. 1, p. 375-390, 1985.

SBCS – SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO / NÚCLEO ESTADUAL PARANÁ. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017. 482 p.

SHAHZAD, Z.; ROUACHED, H.; RAKHA, A. Combating mineral malnutrition through iron and zinc biofortification of cereals. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 13, n. 3, p. 329-346, 2014.

SHEKHAR, C. Hidden hunger: addressing micronutrient deficiences using improved crop varieties. **Chemistry and Biology**, Cambridge, v. 20, p. 1305-1306, 2013.

SILVA, A. G.; ROCHA, L. C.; CANNIATTI, B. S. G. Physico-chemical characterization, protein digestibility and antioxidant activity of commun bean (*Phaseolus vulgaris L.*). **Alimentos e Nutrição**, v. 20, n. 4, p. 591-598, 2009.

SILVA, O. F. da; WANDER, A. E. O feijão comum no Brasil passado, presente e futuro. Santo Antônio de Goiás-GO: **Embrapa Arroz e Feijão**, 2013. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 287).

SIMPSON, B. B.; OGORZALY, M. C. **Economic botany: plants in our world**. 3ª ed. New York: MacGraw-Hill, 2001.

SINGH, J. P.; KARAMANOS, R. E.; STEWART, J. W. B.The mechanism of phosphorus-inducedzinc deficiency in bean (Phaseolus vulgaris L.). **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 68, n. 2, p. 345-358, 1988.

SMEEKENS, S. Sugar-induced signal transduction in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 51, p. 49-81, 2000.

SOUZA, A. DE M. et al. Alimentos mais consumidos no Brasil: Inquérito Nacional de Alimentação 2008-2009, **Revista de Saúde Pública**, vol. 47, p. 190-199, fev. 2013c.

SOUZA, G. A. **Biofortificação da cultura do trigo com zinco, selêno e ferro**: explorando o germoplasma brasileiro. 2013. 112 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013a.

SOUZA, G. A. et al. Evaluation of germplasm effect on Fe, Zn and Se content in wheat seedlings. **Plant Science**, v. 210, p. 206– 213, 2013b.

TACO – **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos**. Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação – NEPA, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

VELU, G. et al. Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat. **Journal of Cereal Science**, v. 59, n. 3, p. 365-372, 2014.

WELCH, R. M. et al. Genetic selection for enhanced bioavailable levels of iron in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 48, p. 3576–3580, 2000.

WHITE, P. J. et al. Relationship between yield and mineral concentrations in potato tubers. **HortScience**, v. 44, p. 6-11, 2009.

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. **The New Phytologist**, Cambridge, v. 182, p. 49-84, Jan. 2009.

WHITE, P.J.; BROADLEY, M.R. Physiological limits to zinc biofortification of edible crops. **Frontiers in *Plant Science***. v. 2, p. 1-11, 2011.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **The world health report 2002: reducing risks, promoting healthy life**. World Health Organization, 2002.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. The world health report 2006: working toghether for health, **WHO**. Geneva, 2006. 237 p.

YIN, S. W. et al. The relationships between physicochemical properties and conformational features of succinylated and acetylated kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein isolates. **Food Research International**, Essex, v. 43, p. 730-738, 2010.

ZAMAN, Q. et al. Zinc biofortification in rice: leveraging agriculture to moderate hidden hunger in developing countries. Arch Agron Soil Sci. v. 64, n. 2, p. 1–15, 2017.

ZHANG, Y. Q. et al. The reduction in zinc concentration of wheat grain upon increased phosphorus-fertilization and its mitigation by foliar zinc application, **Plant and Soil**, vol. 361, n. 1–2, p. 143–152, dez. 2012.

ZHAO, K.; SELIM, H. M. Adsorption-desorption kinetics of Zn in soils: influence of phosphate. **Soil Science**, Baltimore, v. 175, n. 4, p. 145-153, Abr. 2010.

4. CAPÍTULO 2 – BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA COM ZINCO EM FEIJOEIRO-COMUM

4.1. Resumo – A deficiência de zinco (Zn) afeta bilhões de pessoas em todo o mundo. Neste trabalho foram realizados experimentos de campo em duas safras de verão consecutivas com o objetivo de avaliar o efeito da aplicação de Zn via solo e foliar sobre a biofortificação de grãos em duas cultivares de feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), a cultivar BRS Esteio (feijão preto) e a cultivar IPR Campos Gerais (feijão carioca). A cultivar BRS Esteio apresentou maior capacidade de enriquecimento dos grãos com Zn que a cultivar IPR Campos Gerais, havendo, portanto, variação genotípica. A biofortificação dos grãos de feijão com Zn foi mais eficiente com a pulverização foliar que em relação ao fornecimento via solo, na dose de 600 g ha^{-1} de Zn, no estádio inicial de enchimento de grãos, considerando as cultivares testadas e as condições edafoclimáticas da região de estudo. No estádio final de enchimento de grãos, a pulverização foliar de Zn favoreceu o aumento de teor de Zn nas vagens em detrimento do teor de Zn nos grãos. A aplicação de Zn no sulco de semeadura favoreceu o aumento de teores de aminoácidos totais e das proteínas de reserva albuminas, globulinas e prolaminas nos grãos de feijão.

Palavras-Chave: *Phaseolus vulgaris* L., agricultura, nutrição de planta, micronutriente, segurança alimentar

AGRONOMIC BIOFORTIFICATION WITH ZINC IN COMMON BEAN

4.2. Abstract - Zinc deficiency (Zn) affects billions of people worldwide. The objective of this study was to evaluate the effect of the soil and foliar application of Zn on the grain nutritional quality in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Field experiments were carried out in two consecutive summer harvests under no-till system in an oxisol of the South region of Brazil. Two common bean cultivars were used: BRS Esteio (black bean) and IPR Campos Gerais (Carioca bean). The cultivar BRS Esteio exhibited higher grain enrichment with Zn than the cultivar IPR Campos Gerais, showing genotypic variation. Single leaf spray of 600 g ha^{-1} of Zn at the initial grain filling stage was shown to be the best way to improve the grain Zn content, without affecting grain yield, considering the cultivars tested and the edaphoclimatic conditions of the study area. Leaf spray of Zn at the final stage of grain filling favored the increase of pod Zn content in detriment of grain Zn content. The application of Zn via soil increased the concentrations of total amino acids, albumins, globulins and prolamins of the bean grains.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L., agriculture, plant nutrition, micronutrient, nutritional safety

4.3. Introdução

O acréscimo da produtividade nos cultivos agrícolas para atender o aumento da população mundial resultou em perda de qualidade nutricional dos alimentos, principalmente após a Revolução Verde. Dentre os nutrientes mais comumente deficientes no plasma sanguíneo das pessoas, destacam-se a vitamina A, ferro (Fe), selênio (Se), iodo (I) e zinco (Zn) (BOUIS, 2018).

Assim, embora a produção de alimentos tenha acompanhado o crescimento populacional, atualmente é comum a ocorrência de deficiências nutricionais na população em todo o mundo, especialmente a de baixa renda.

Estudos apontam que mais de 2 bilhões de pessoas no mundo apresentam sérios problemas de saúde devido à deficiência de micronutrientes, especialmente de Fe e Zn (VELU et al., 2014). Em países em desenvolvimento, a deficiência de Zn está listada como o quinto fator de risco para a saúde humana (SHAHZAD; ROUACHED; RAKHA, 2014).

Estudos apontam que o Zn, quando ingerido diariamente de forma adequada, reduz a incidência de câncer, distúrbios neurológicos e doenças autoimunes em humanos (BLACK et al., 2008; CHASAPIS et al., 2012). Ainda, o Zn atua na maturação hepática da vitamina A e na fertilidade e reprodução em humanos (LEVENSON; MORRIS, 2011; GIBSON, 2012). Em crianças, a deficiência de Zn se expressa como retardo no crescimento, anorexia e hipogeusia (BROWN et al., 2002), enquanto que em adultos, na forma de doenças crônicas e complicações na gravidez (PRASAD, 2001; MORI et al., 2012).

O Zn é um nutriente para humanos por fazer parte de uma série de reações químicas essenciais para o metabolismo normal dos mamíferos. Depois do Fe, o Zn é o segundo elemento traço mais abundante no corpo humano e o mais abundante no interior das células, sendo constituinte de aproximadamente 300 metaloenzimas (LIVINGSTONE, 2015). No proteoma humano, o Zn é responsável pela estabilidade e atividade catalítica de até 10 % das proteínas. Ainda, o Zn é essencial para a síntese de inúmeras proteínas e eliminação de espécies reativas de oxigênio (RAM et al., 2016) por meio das metalo-enzimas SODs (superóxido dismutases) que atuam na catalisação de dois radicais O_2, formando H_2O_2 e O_2, agindo a partir daí, também no controle dos nível de H_2O_2 em mitocôndrias, cloroplastos, citosol e peroxissomos (BHATTACHARJEE, 2010).

A ingestão de micronutrientes por meio de suplementos nutricionais (cápsulas ou produtos enriquecidos, durante seu processamento nas indústrias), além de resultar em alto custo, o que favorece apenas as classes sociais mais privilegiadas, apresenta maior risco de toxidez por ingestão excessiva (MARQUES; MARQUES; XAVIER, 2012; MORRIS e CRANE, 2013). Assim, a técnica da biofortificação de culturas agrícolas com Zn consiste no aumento da concentração desse elemento nos alimentos básicos, especialmente nas culturas de grãos, através da sua introdução nos programas de adubação e por melhoramento genético de cultivares, visando atender à necessidade humana, especialmente a de baixa renda (PRASAD et al., 2014; VELU et al., 2014), como o descrito por alguns autores (CAKMAK et al., 2010; DUARTE et al., 2013; SOUZA et al., 2013b; FIGUEIREDO, 2016; RAM et al., 2016; MOLOTO et al., 2018).

No Brasil, o Zn é o micronutriente de planta mais deficiente nos solos em condições naturais, o que agrava ainda mais a sua deficiência no plasma sanguíneo da população de baixa renda (PEDRAZA; DANTAS ROCHA, 2016; BRITO MELO et al., 2017). A escolha de culturas agrícolas cujos produtos são amplamente consumidos pela população possibilita maior sucesso nos programas de biofortificação. O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma importante cultura de grãos para o consumo humano no Brasil, sendo essencial fonte de proteínas para a população de baixa renda do Terceiro Mundo (BLAIR, 2013; RAM et al., 2016).

A realização de experimentos visando o enriquecimento do feijoeiro-comum com Zn a nível de campo pode trazer importantes informações para os programas de biofortificação, sendo que, além de fatores genéticos, a qualidade nutricional dos grãos de feijão é também influenciada pelos fatores edafoclimáticos.

O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da aplicação de Zn no solo (durante a semeadura) e via foliar (por meio de pulverizações foliares com doses de Zn em diferentes estádios fenológicos) sobre a biofortificação de grãos em cultivares de feijoeiro-comum.

4.4. Material e Métodos

4.4.1. Descrição da área experimental

A área experimental encontra-se no *Campus* Cedeteg da UNICENTRO (Universidade Estadual do Centro-Oeste), no município de Guarapuava, Estado do Paraná, Brasil, com coordenadas geográficas 25°23'2"S 51°29'43"W, e altitude média de 1026 m. O município de Guarapuava se localiza na região subtropical do Brasil, com predominância de clima temperado de altitude – Cfb, conforme a classificação de Köppen-Geiger, apresentando nos meses mais frio e mais quente, temperaturas médias menores que 18 e 22ºC, respectivamente.

Inicialmente, antes da instalação dos experimentos, a área experimental foi cultivada com espécies forrageiras em sistema de plantio direto. Previamente a instalação dos experimentos, realizaram-se amostragens de solo na área experimental, considerando a camada de 0-20 cm de profundidade, e foram feitas as análises químicas conforme a metodologia oficial para o Estado do Paraná, Brasil (PAVAN et al., 1992; EMBRAPA, 2017), obtendo-se os seguintes resultados: pH ($CaCl_2$ 0,01 mol L^{-1}) = 5,06; matéria orgânica = 41,03 g kg^{-1}; S-SO_4^{2-} = 5,85 mg dm^{-3}; P (extrator Mehlich-1) = 8,46 mg dm^{-3}; K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Al^{3+} e CTC-pH 7 = 0,50, 4,41, 1,30, 0,00 e 10,25 $cmol_c$ dm^{-3}, respectivamente; e os micronutrientes Cu^{2+}, Mn^{2+}, Fe^{2+} e Zn^{2+} (extrator Mehlich-1) = 2,46, 74,44, 68,79 e 9,86 mg dm^{-3}, respectivamente. Destaca-se que, segundo o Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná, o nível de Zn^{2+} encontrado no solo é considerado alto (entre 1,30 a 10,00 mg dm^{-3}) (SBCS, 2017). Baseado nos resultados da análise química do solo, foi feita a calagem (aplicação de calcário a lanço em área total sem incorporação no solo) para elevar a saturação por bases para 70 % e ajuste da relação entre os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} para quatro.

4.4.2. Tratamentos e delineamento experimental

Neste trabalho, foram realizados experimentos em dois anos agrícolas (safras de verão 2016/2017 e 2017/2018) com a cultura do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) em sistema de plantio direto. Entre as duas safras de verão com o feijoeiro-comum foi cultivado o trigo (safra de inverno 2017) para manutenção do sistema de rotação de culturas da área. Usou-se o espaçamento entrelinhas de 50 cm e 12 plantas por metro linear, resultando em população de

aproximadamente 240 mil plantas por hectare. As adubações de plantio e cobertura foram feitas de acordo com os resultados da análise química do solo, e os controles de plantas daninhas, pragas e doenças, conforme recomendações técnicas para a cultura na região.

4.4.2.1. Experimento na safra de verão 2016/2017

Este estudo verificou a melhor dose de Zn para pulverização foliar do feijoeiro-comum durante estádio de enchimento de grãos, visando o enriquecimento de Zn nos grãos de feijão.

Um experimento de campo foi conduzido com a cultura do feijoeiro-comum, utilizando-se a cultivar BRS Esteio (pertencente ao grupo de feijão preto). A semeadura do feijoeiro-comum no campo foi feita em meados de janeiro de 2017.

O delineamento foi de blocos ao acaso (DBC) com quatro repetições, contendo seis tratamentos de doses de Zn aplicadas via foliar: 0 (sem aplicação foliar), 300, 600, 900, 1200 e 1500 g ha^{-1}, utilizando-se o sulfato de zinco heptahidratado p.a. ($ZnSO_4.7H_2O$ p.a.) da marca Merck®. As doses de Zn foram aplicadas no estádio inicial do enchimento de grãos (estádio fenológico R8) por meio de pulverizador costal pressurizado com CO_2, usando uma vazão de calda de 160 L ha^{-1}. O estádio de desenvolvimento da cultura foi verificado conforme a escala do Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), descrita em Fernández et al. (1986). Cada parcela experimental foi constituída por 8 linhas de plantas com 5 m de comprimento.

4.4.2.2. Experimentos na safra de verão 2017/2018

Após a obtenção da melhor dose de Zn via foliar (600 g ha^{-1}) com a condução do experimento da safra de verão 2016/2017 (1ª safra), o experimento da safra de verão 2017/2018 (2º safra) avaliou o efeito da aplicação de Zn no solo e verificou a melhor época e número de aplicações de Zn via foliar em duas cultivares de feijoeiro-comum, visando também o enriquecimento de Zn nos grão de feijão.

Dois experimentos de campo com a cultura do feijoeiro-comum foram instalados ao mesmo tempo na área experimental em meados de dezembro de 2017. Em um experimento foi usado a cultivar BRS Esteio (pertencente ao grupo preto) e em outro a cultivar IPR Campos Gerais (pertencente ao grupo carioca), ambas com ciclo médio de 88 dias (EMBRAPA, 2019; IAPAR, 2019). Os tratamentos utilizados em ambos os experimentos foram os mesmos e

realizados nos mesmos estádios fenológicos. Em cada experimento, o delineamento experimental foi de blocos ao acaso (DBC), em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições.

Nas parcelas foi estudado o fator Zn via solo, composto por dois tratamentos de aplicação de Zn no solo (sem e com 4 kg ha^{-1} de Zn), usando os adubos formulados NPK sem Zn (12-27-06) e NPK com Zn (12-27-06 com 1 % de Zn), ambos da marca Yara Brasil Fertilizantes S/A, na mesma época. O adubo NPK (com e sem Zn) foi aplicado no sulco de semeadura, na dosagem de 400 kg ha^{-1}.

Nas subparcelas foi estudado o fator Zn via foliar, composto por oito tratamentos de épocas e número de aplicações foliares de Zn, sendo: 1) sem pulverização foliar (SPF); 2) única pulverização foliar realizada no estádio de florescimento (E1); 3) única pulverização foliar realizada no estádio inicial de enchimento de grãos (E2); 4) única pulverização foliar realizada no estádio final de enchimento de grãos (E3); 5) duas pulverizações foliares realizadas nos estádios de florescimento e início de enchimento de grãos (E1+E2); 6) duas pulverizações foliares realizadas nos estádios de florescimento e final de enchimento de grãos (E1+E3); 7) duas pulverizações foliares realizadas nos estádios inicial e final de enchimento de grãos (E2+E3); e 8) três pulverizações foliares realizadas no estádio de florescimento e estágios inicial e final de enchimento de grãos (E1+E2+E3). Os estádios de florescimento e enchimento de grãos do feijoeiro-comum estabelecidos neste trabalho são correspondentes com os estádios fenológicos R6 e R8, respectivamente, propostos por Fernández et al. (1986). Em todos os tratamentos, o Zn foi aplicado na dose de 600 g ha^{-1} por meio de um pulverizador costal, usando a vazão de calda de 160 L ha^{-1}. A fonte de Zn utilizada para o preparo da calda de pulverização foi o $ZnSO_4.7H_2O$ p.a. (marca Merck®). Cada subparcela experimental foi composta por 4 linhas de plantas com 5 metros de comprimento.

4.4.3. Avaliação da produtividade de grãos e teores de Zn nos grãos e nas vagens

No final do ciclo da cultura, após a maturação fisiológica (estádio fenológico R9), na área útil de cada parcela (experimento da safra 2016/2017) e subparcela (experimentos da safra 2017/2018) foram colhidas plantas em três linhas de um metro linear cada. A produtividade de grãos de cada linha (com umidade ajustada para 13 %) foi determinada, obtendo-se a estimativa da produtividade média de grãos em kg ha^{-1}.

As análises de teores de Zn nos grãos e vagens foram realizadas a partir de extratos obtidos após a digestão nítrico-perclórica (Embrapa, 2009), no Laboratório de Solos e Nutrição Mineral de Plantas do *Campus* Cedeteg da UNICENTRO. Previamente, amostras de grãos e vagens foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 58-60° C até peso constante, moídas em um moinho do tipo *Willey*, e armazenadas até a realização das respectivas análises.

4.4.4. Determinação dos teores de açúcares totais, sacarose, aminoácidos totais e proteínas de reserva (albuminas, globulinas, glutelinas e prolaminas) nos grãos

No material de grãos secos e moídos foram realizadas as análises de teores de albuminas, globulinas, prolaminas, glutelinas, açúcares totais, sacarose e aminoácidos totais, no Laboratório de Biologia do curso de Engenhara de Biossistemas da Universidade Estadual Paulista (UNESP), *Campus* de Tupã-SP, Brasil.

As análises foram realizadas a partir de amostras de grãos extraídas em 10 mL de solução de MCW (60 % de metanol, 25 % de clorofórmio e 15 % de água) e preparadas para análises conforme descrito por Bieleski e Turner (1966). Os teores de açúcares totais e sacarose foram quantificados conforme os protocolos de Dubois et al. (1956) e Van Handel (1968) e os teores de aminoácidos totais foram determinados com ninidrina de acordo com Yemm e Cocking (1955).

Para a extração das proteínas de reserva foram pesados 0,20 g de grãos secos e moídos e submetidos a extração sequencial com 12 mL de água deionizada (para albumina), 5 mL de NaCl a 5,0 % (para globulina), 5 mL de etanol a 60 % (para prolamina) e 3 mL de NaOH a 0,4 % (para glutelina). A concentração de proteína foi determinada de acordo com Bradford (1976), usando uma solução de BSA (albumina de soro bovino) como padrão.

4.4.5. Análise estatística dos dados

A normalidade dos dados foi testada pelo teste de Shapiro-Wilk's ($p < 0,05$) com auxílio do *software* R versão 3.5.1. (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA, $p \leq 0,05$) usando o *software* estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011) e, quando houve significância, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

4.5. Resultados e Discussão

4.5.1. Produtividade e teores de Zn nos grãos e nas vagens

Durante a condução dos experimentos de campo, tanto na safra 2016/2017 quanto na safra 2017/2018, a precipitação pluviométrica e a temperatura média foram adequadas para o cultivo do feijoeiro-comum, verificados a partir de uma estação meteorológica da rede do Instituto Agronômico do Estado do Paraná (IAPAR), localizada a 50 m da área experimental.

A média de produtividade de grãos da cultivar BRS Esteio no experimento da safra 2016/2017 foi 2957 kg ha^{-1}, e não foi significativamente afetada pelos tratamentos de doses de Zn via foliar no estádio inicial de enchimento de grãos. Essa produtividade está próxima da média de produtividade de cinco anos (período de 2005 a 2010) encontrada por Pereira et al. (2013) para a mesma cultivar no Estado do Paraná, Brasil.

Nos experimentos da safra 2017/2018, as médias de produtividade de grãos das cultivares BRS Esteio e IPR Campos Gerais foram maiores que na safra anterior, sendo 3266 e 3372 kg ha^{-1}, respectivamente. A aplicação de 4 kg ha^{-1} de Zn no solo, bem como a pulverização foliar de 600 g ha^{-1} Zn nos estádios inicial e, ou, final de enchimento de grãos não afetaram a produtividade. Assim, considerando ambas as safras, mostra-se que a pulverização foliar de Zn no estádio fenológico R8 não alterou a produtividade de grãos. Abreu et al. (2016) também não encontraram acréscimo de produtividade para a cultura do milho com a aplicação de doses de Zn no solo durante o plantio, embora houve acréscimo de teor de Zn nas folhas.

Por outro lado, a pulverização foliar de Zn durante o florescimento reduziu a produtividade de grãos da cultivar BRS Esteio e resultou em pequeno aumento de produtividade para a cultivar IPR Campos Gerais. Assim, a aplicação foliar de Zn no estádio fenológico R6 do feijoeiro-comum ainda necessita de mais estudos referente às cultivares e às doses de Zn.

O foco deste estudo foi verificar o efeito dos tratamentos sobre a qualidade nutricional dos grãos, sem negativamente afetar a produtividade. No experimento da safra 2016/2017, o teor de Zn nos grãos foi afetado pela aplicação de Zn via foliar ($p < 0,01$) (Figura 1).

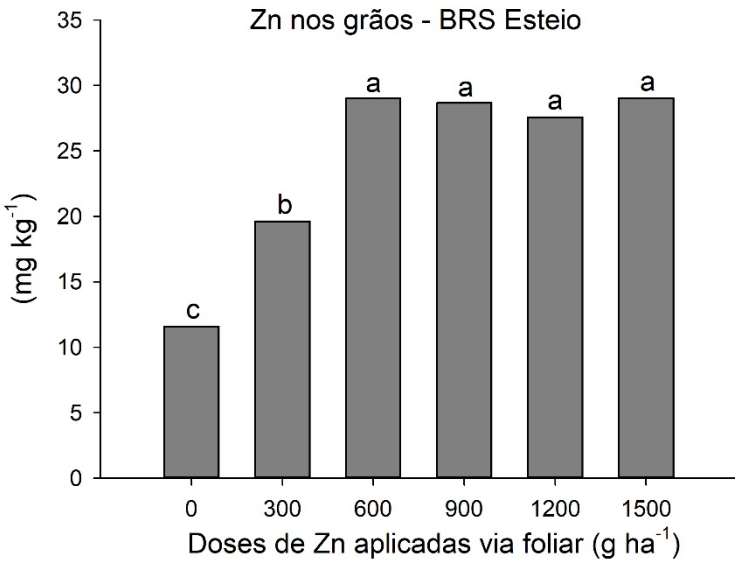

Figura 1. Teor de Zn nos grãos em feijoeiro-comum 'BRS Esteio', em função de doses de Zn (0, 300, 600, 900, 1200 e 1500 g ha^{-1}) aplicadas via foliar no estádio inicial de enchimento de grãos, na safra de verão 2016/2017.
Médias seguidas da mesma não diferem entre si (Scott-Knott, $p < 0,05$).

Todas as doses de Zn aplicadas via foliar no estádio de enchimento de grãos elevaram os teores de Zn nos grãos. Por exemplo, nas doses 0 (sem aplicação foliar) e 600 g ha^{-1} de Zn aplicado via foliar, o teor médio de Zn nos grãos foi 11,6 e 29,0 mg kg^{-1}, respectivamente (acréscimo de 150,7 %). Ram et al. (2016) também verificaram efeito positivo da aplicação foliar de Zn sobre o enriquecimento de Zn em grãos de trigo, arroz e feijão-comum, a partir de experimentos que abrangeu sete países (Brasil, China, Índia, Paquistão, Tailândia, Turquia e Zâmbia), utilizando-se assim diferentes cultivares e condições edafoclimáticas.

Observando a Figura 1, verifica-se que a partir da dose 600 até 1500 g ha^{-1} de Zn, os teores de Zn nos grãos foram bem próximos e não houve diferenças significativas nas doses. Assim, parece que há uma saturação da capacidade das folhas de feijoeiro BRS Esteio em absorver o Zn via foliar e translocá-lo para os grãos, a partir de certa concentração do elemento na calda de pulverização. Tal resultado se mostrou diferente daquele encontrado por Cambraia (2015), que observou maior teor de Zn nos grãos de feijão com a aplicação foliar de 1200 g ha^{-1} de Zn.

Para os experimentos da safra 2017/2018, o teor de Zn nos grãos da cultivar BRS Esteio foi influenciado pela interação entre os fatores (Zn via solo × Zn via foliar) ($p < 0,05$), enquanto que o teor de Zn nos grãos da cultivar IPR Campos Gerais foi afetado apenas pelo fator Zn via foliar ($p < 0,001$), não havendo variações significativas para o fator Zn via solo ($p > 0,05$) (Figura 2).

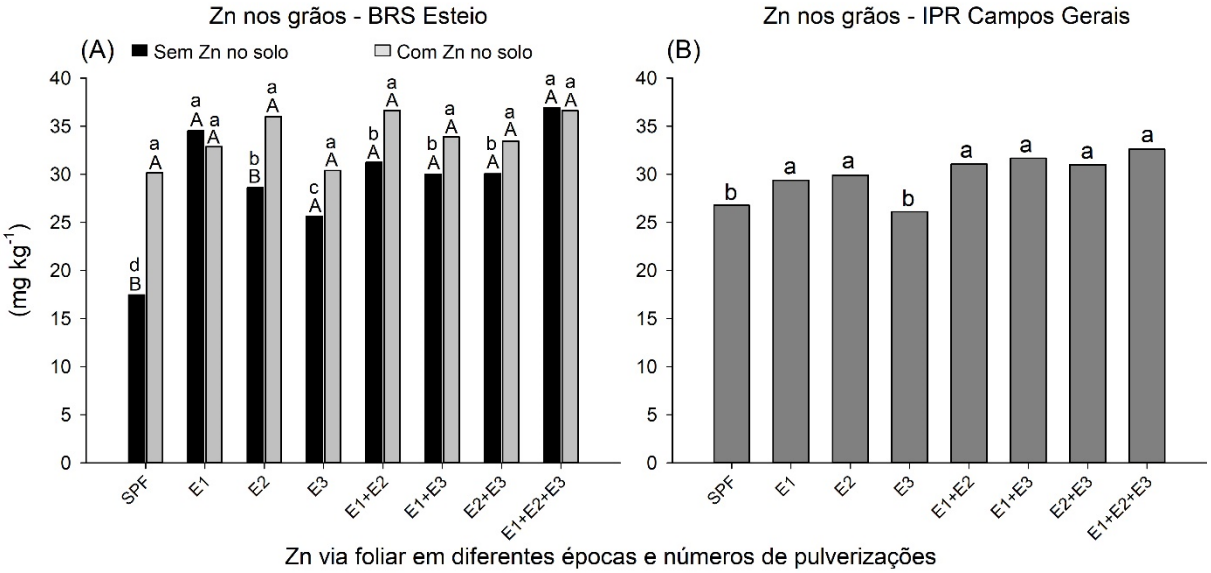

Figura 2. Teor de Zn nos grãos em feijoeiro-comum 'BRS Esteio', em função da aplicação de Zn via solo (sem e com Zn no solo) e aplicação foliar em diferentes épocas e números de pulverizações (Figura 2A), e em feijoeiro-comum 'IPR Campos Gerais', em função da aplicação foliar em diferentes épocas e números de pulverizações (Figura 2B), na safra de verão 2017/2018.

Tratamento sem pulverização foliar (SPF); tratamentos com uma pulverização: estádio de florescimento (E1), estádio inicial de enchimento de grãos (E2) e estádio final de enchimento de grãos (E3); tratamentos com duas pulverizações: E1+E2, E1+E3 e E2+E3; tratamento com três pulverizações: E1+E2+E3.

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si (Scott-Knott, $p < 0,05$). Quando houve interação entre os fatores (Figura 2A), letra minúscula compara os tratamentos de doses de Zn via foliar dentro de cada tratamento de doses de Zn via solo, e letra maiúscula compara os tratamentos de doses de Zn via solo dentro de cada tratamento de doses de Zn via foliar.

Para a cultivar BRS Esteio (Figura 2A), analisando os efeitos dos tratamentos de Zn via foliar dentro de cada tratamento de Zn via solo, sem a aplicação de Zn no solo, o teor de Zn nos grãos do tratamento SPF e a média de todos os tratamentos com pulverização foliar foram 17,5 e 31,0 mg kg^{-1}, respectivamente (aumento de 77,4 %). Porém, com a aplicação de Zn no solo, a média de teor de Zn nos grãos foi 33,7 mg kg^{-1} e não houve variações significativas das doses de Zn via foliar.

Ainda na Figura 2A, analisando o efeito dos tratamentos de Zn via solo dentro de cada tratamento de Zn via foliar, sem a pulverização foliar (SPF), a aplicação de 4 kg ha^{-1} de Zn no sulco de semeadura elevou o teor de Zn nos grãos em 72,6 %. Mas, com a pulverização foliar de Zn, independentemente da época e número de pulverizações, a aplicação de Zn via solo teve pouco efeito sobre o teor de Zn dos grãos da cultivar BRS Esteio.

Para a cultivar IPR Campos Gerais (Figura 2B), os tratamentos SPF e E3 apresentaram em média 26,4 mg kg^{-1} de Zn nos grãos, enquanto que os demais tratamentos de Zn via foliar

(E1, E2, E1+E2, E1+E3, E2+E3 e E1+E2+E3) tiveram em média 30,9 mg kg^{-1} de Zn (acréscimo de 17 %). Figueiredo (2016) obteve acréscimo em teor de Zn nos grãos de cultivares de feijão-comum do grupo carioca com a aplicação de Zn tanto no sulco de semeadura (dose de 4 kg ha^{-1}) quanto via foliar (doses de 100, 200, 400 e 800 g ha^{-1}).

Observa-se, então, que o incremento de Zn nos grãos de feijoeiro-comum com a fertilização do solo ou pulverização foliar é viável, mas, ainda necessita de estudos, devido às características genéticas de cada cultivar e as diferentes condições edafoclimáticas de cada região de cultivo. Ressalta-se que a absorção de Zn pelas raízes das plantas pode ser afetada por diversos fatores (CASTRO-GUERRERO et al., 2016). Um exemplo foi verificado por Scalco et al. (2014) na cultura do cafeeiro, sendo que a irrigação ocasionou aumento no teor foliar de fósforo correlacionando negativamente com o decréscimo do teor foliar de Zn.

Assim, analisando os resultados das duas safras, verificou-se que a única aplicação foliar de 600 g ha^{-1} de Zn no estádio inicial de enchimento de grãos foi o melhor tratamento para enriquecer os grãos da cultivar BRS Esteio com Zn, resultando em médias de 28,9 e 32,3 mg kg^{-1} de Zn nos grãos para as safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente (mostrando teores próximos entre as duas safras), sem causar alterações na produtividade de grãos, corroborando com os resultados de Figueiredo (2016). Na safra 2017/2018 foi constatado que a realização de mais de uma pulverização foliar, que eleva o custo operacional, não melhorou satisfatoriamente o teor de Zn nos grãos de ambas as cultivares, em comparação à única pulverização no estádio inicial de enchimento de grãos. A pulverização de 600 g ha^{-1} de Zn no estádio de florescimento resultou em menor produtividade de grãos na cultivar BRS Esteio, necessitando de mais estudos a respeito com cultivares e doses de Zn para pulverização foliar nesse estádio fenológico. Já a pulverização de Zn no estádio final de enchimento de grãos foi menos eficiente em elevar o teor de Zn nos grãos que a pulverização no estádio inicial de enchimento de grãos. Além disso, a aplicação de Zn no solo foi eficiente em elevar o teor de Zn nos grãos da cultivar BRS Esteio, mas, não teve efeito significativo sobre a cultivar IPR Campos Gerais, mostrando variação genotípica, necessitando também de mais estudos a respeito quando o objetivo for o enriquecimento dos grãos de feijão com Zn.

Além de ser um alimento básico da população de baixa renda do Terceiro Mundo, naturalmente, a cultura do feijoeiro-comum é conhecida por apresentar maiores teores de Fe e Zn nos grãos em comparação aos cereais (CASTRO-GUERRERO et al., 2016), sendo uma interessante cultura para os programas de biofortificação com esses nutrientes. Porém, elevadas

doses de Zn no meio de crescimento, especialmente nos estádios inicias de desenvolvimento da planta, pode ser tóxico para a cultura do feijoeiro, como foi constatado por Figueiredo (2016) em plantas de feijoeiro cultivadas em solução nutritiva. Porém, a resposta da planta de feijoeiro-comum, quanto também para outras culturas, em função da aplicação de Zn varia conforme o genótipo (CORGUINHA et al., 2013; SOUZA et al., 2013; 2014; CASTRO-GUERRERO et al., 2016; QASWAR et al., 2017; SAHA et al., 2017).

Nesse trabalho, foi também analisado o teor de Zn nas vagens para verificar se essa parte da planta atua ou não como um fator de dreno de Zn. A Figura 3 apresenta o teor de Zn nas vagens do experimento da safra 2016/2017, apresentando significância para o fator dose de Zn via foliar ($p < 0,001$).

Os tratamentos 600, 900 e 1200 g ha^{-1} de Zn tiveram o maior teor de Zn nas vagens, seguido pelos tratamentos 300 e 1500 g ha^{-1} de Zn, enquanto que sem pulverização foliar de Zn (dose 0 g ha^{-1}) teve o menor valor. Entretanto, em todos os tratamentos de doses foliares de Zn testados, o teor de Zn nas vagens (Figura 3) foi bem menor que nos grãos (Figura 1). Por exemplo, sem a pulverização foliar, o teor de Zn nos grãos e nas vagens foram em média 12,4 e 8,0 mg kg^{-1}, respectivamente, sendo 55 % maior nos grãos que nas vagens. Contudo, essa diferença foi bem maior com a pulverização foliar (realizada no estádio inicial de enchimento de grãos); por exemplo, na dose 600 g ha^{-1} de Zn, o teor de Zn nos grãos e nas vagens foram 29,0 e 8,8 mg kg^{-1}, respectivamente, sendo 230 % maior nos grãos que nas vagens.

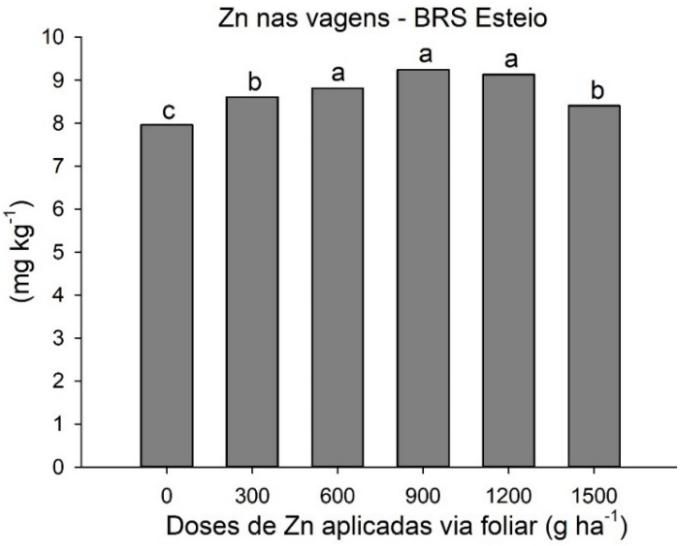

Figura 3. Teor de Zn nas vagens em feijoeiro-comum 'BRS Esteio', em função da aplicação de doses de Zn via foliar (0, 300, 600, 900, 1200 e 1500 g ha^{-1}) no estádio inicial de enchimento de grãos, na safra de verão 2016/2017.
Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si (Scott-Knott, $p < 0,05$).

São raros os trabalhos de campo com feijoeiro-comum que compararam teores de Zn nas vagens e nos grãos. Em experimento de campo com a cultura da soja no Iran foi relatado que os teores de Zn foram cerca de 1,28, 1,36, e 1,72 vezes maior nos grãos que nas vagens em função da aplicação de 0, 20, e 40 kg ha^{-1} de sulfato de zinco no solo, respectivamente (KOBRAEE; SHAMSI, 2011).

A Figura 4 mostra o teor de Zn nas vagens dos experimentos da safra 2017/2018. Tanto para a cultivar BRS Esteio (Figura 4A) quanto com a cultivar IPR Campos Gerais (Figura 4B), houve efeito significativo apenas para o fator Zn via foliar ($p < 0,001$), não sendo observada significância para o fator Zn via solo ($p > 0,05$).

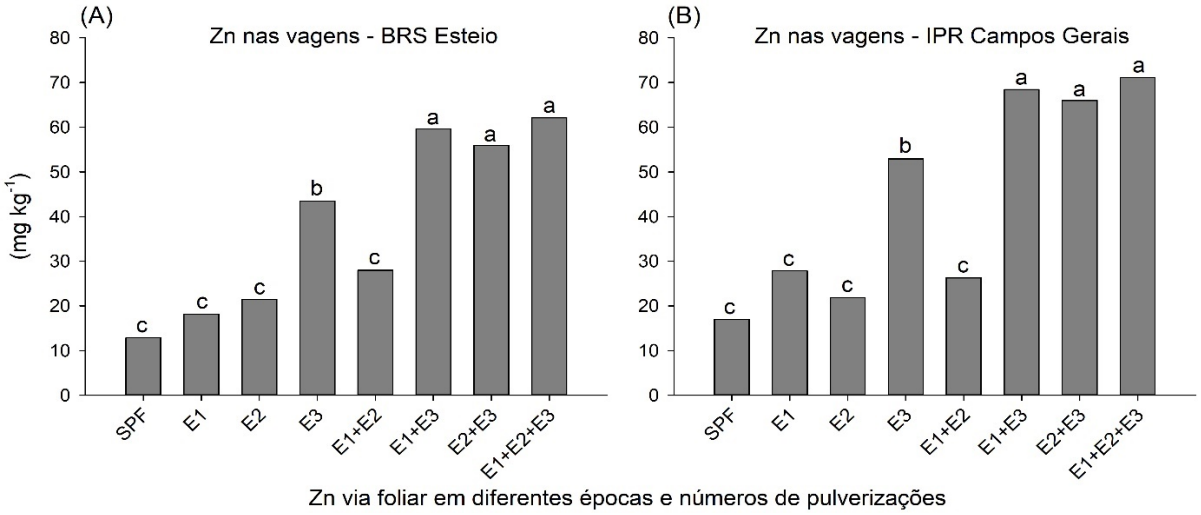

Figura 4. Teor de Zn nas vagens em feijoeiro-comum 'BRS Esteio' (Figura 4A) e 'IPR Campos Gerais' (Figura 4B), em função da aplicação foliar de Zn em diferentes épocas e números de pulverizações, na safra de verão 2017/2018.
Tratamento sem pulverização foliar (SPF); tratamentos com uma pulverização: estádio de florescimento (E1), estádio inicial de enchimento de grãos (E2) e estádio final de enchimento de grãos (E3); tratamentos com duas pulverizações: E1+E2, E1+E3 e E2+E3; tratamento com três pulverizações: E1+E2+E3.
Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si (Scott-Knott, $p < 0,05$).

Em ambas as cultivares, o teor de Zn nas vagens foi bem maior para os tratamentos que receberam pulverização foliar de 600 g ha^{-1} de Zn no estádio final de enchimento de grãos (E3). Com a pulverização em E3, o maior teor de Zn nas vagens foi observado nos tratamentos com duas ou três pulverizações (tratamentos E1+E3, E2+E3 e E1+E2+E3), apresentando médias de 59,2 e 68,5 mg kg^{-1} de Zn nas vagens para a cultivar BRS Esteio e cultivar IPR Campos Gerais, respectivamente, seguido pelo tratamento com única pulverização em E3, sendo 43,5 e 52,9 mg kg^{-1} de Zn nas vagens para a cultivar BRS Esteio e cultivar IPR Campos Gerais,

respectivamente. Sem a pulverização foliar em E3 (tratamentos SPF, E1, E2, E1+E2), as médias foram bem menores, sendo cerca de 20,1 e 23,2 mg kg^{-1} de Zn nas vagens para a cultivar BRS Esteio e cultivar IPR Campos Gerais, respectivamente.

As vagens de algumas sementes de leguminosa podem contribuir com 4 a 39 % do conteúdo total de minerais (incluindo o Zn) na semente (HOCKING; PATE, 1977). Porém, em estádio fenológico mais avançado, como por exemplo em estágio final de enchimento de grãos, essa transferência de minerais pode ser reduzida, ou seja, as vagens passam a atuar como "dreno" em detrimento ao acúmulo de minerais nos grãos.

A Figura 2 mostrou que houve tendência de redução de teor de Zn nos grãos para o tratamento com única pulverização em E3, em comparação com as demais épocas de pulverização foliar (E1, E2, E1+E2, E1+E3, E2+E3 e E1+E2+E3). Assim, em comparação com as pulverizações foliares de Zn feitas nos estádios de florescimento (E1) e início de enchimento de grãos (E2), no E3 houve maior teor de Zn nas vagens em detrimento ao teor de Zn nos grãos, que é indesejável nos programas de biofortificação.

Diferentemente do teor de Zn nos grãos, o teor de Zn nas vagens da cultivar BRS Esteio foi numericamente bem maior na safra 2017/2018 que na safra anterior (2016/2017). Por exemplo, as pulverizações de 600 g ha^{-1} de Zn no estádio inicial de enchimento de grãos resultaram em 8,8 e 21,4 mg kg^{-1} de Zn nas vagens da cultivar BRS Esteio nas safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente. Neste caso, a diferença entre os teores de Zn nos grãos e nas vagens da cultivar BRS Esteio foi menor na safra 2017/2018 em relação à safra anterior.

4.5.2. Teores de aminoácidos totais, sacarose, açúcares totais e proteínas de reserva (albuminas, globulinas, glutelinas e prolaminas) nos grãos

Os teores de aminoácidos totais, sacarose e açúcares totais nos grãos da cultivar BRS Esteio cultivada na safra 2016/2017 foram afetados pelas doses de Zn via foliar ($p < 0,001$) (Figura 5).

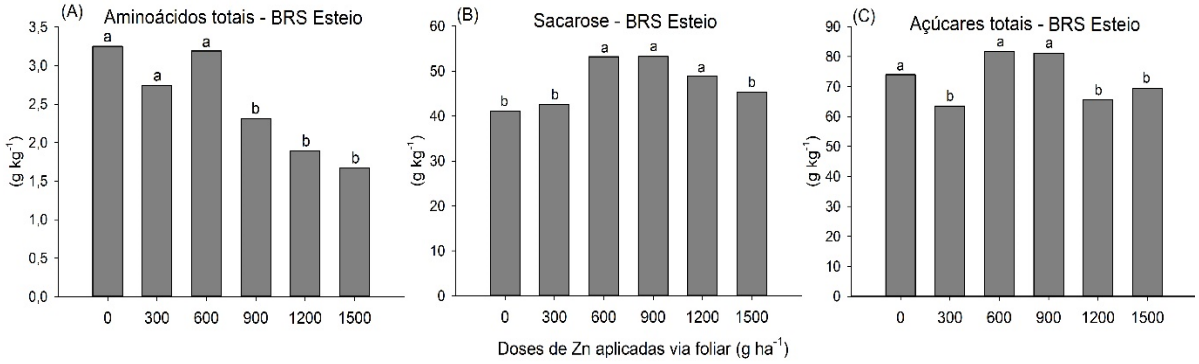

Figura 5. Teores de aminoácidos totais (Figura 5A), sacarose (Figura 5B) e açúcares totais (Figura 5C) nos grãos em feijoeiro-comum 'BRS Esteio', em função da aplicação de doses de Zn via foliar (0, 300, 600, 900, 1200 e 1500 g ha^{-1}) no estádio inicial de enchimento de grãos, na safra de verão 2016/2017.
Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si (Scott-Knott, $p < 0,05$).

Nas três maiores doses de Zn via foliar (900, 1200 e 1500 g ha^{-1}) verificou-se decréscimo nos teores de aminoácidos totais (Figura 5A). Entretanto, nas doses intermediárias (600 e 900 g ha^{-1}) houve os maiores teores de sacarose (Figura 5B) e açúcares totais (Figura 5C). Dessa forma, na safra 2016/2017, a aplicação de 600 g ha^{-1} de Zn na cultivar BRS Esteio em estádio de enchimento de grãos favoreceu o acúmulo de sacarose e açucares totais sem afetar os de aminoácidos totais nos grãos de feijão.

A Figura 6 apresenta os dados de teores de aminoácidos totais, sacarose e açúcares totais dos grãos colhidos na safra 2017/2018. Houve efeito significativo da interação entre os fatores (Zn via solo × Zn via foliar) para teores de aminoácidos totais ($p < 0,001$) (Figuras 6A e 6B) e de sacarose ($p < 0,01$) (Figuras 6C e 6D). Para os teores de açúcares totais nos grãos, não houve efeito dos tratamentos ($p > 0,05$) para a cultivar BRS Esteio (Figura 6E) e verificou-se efeito do fator Zn via foliar ($p < 0,01$) para a cultivar IPR Campos Gerais (Figura 6F).

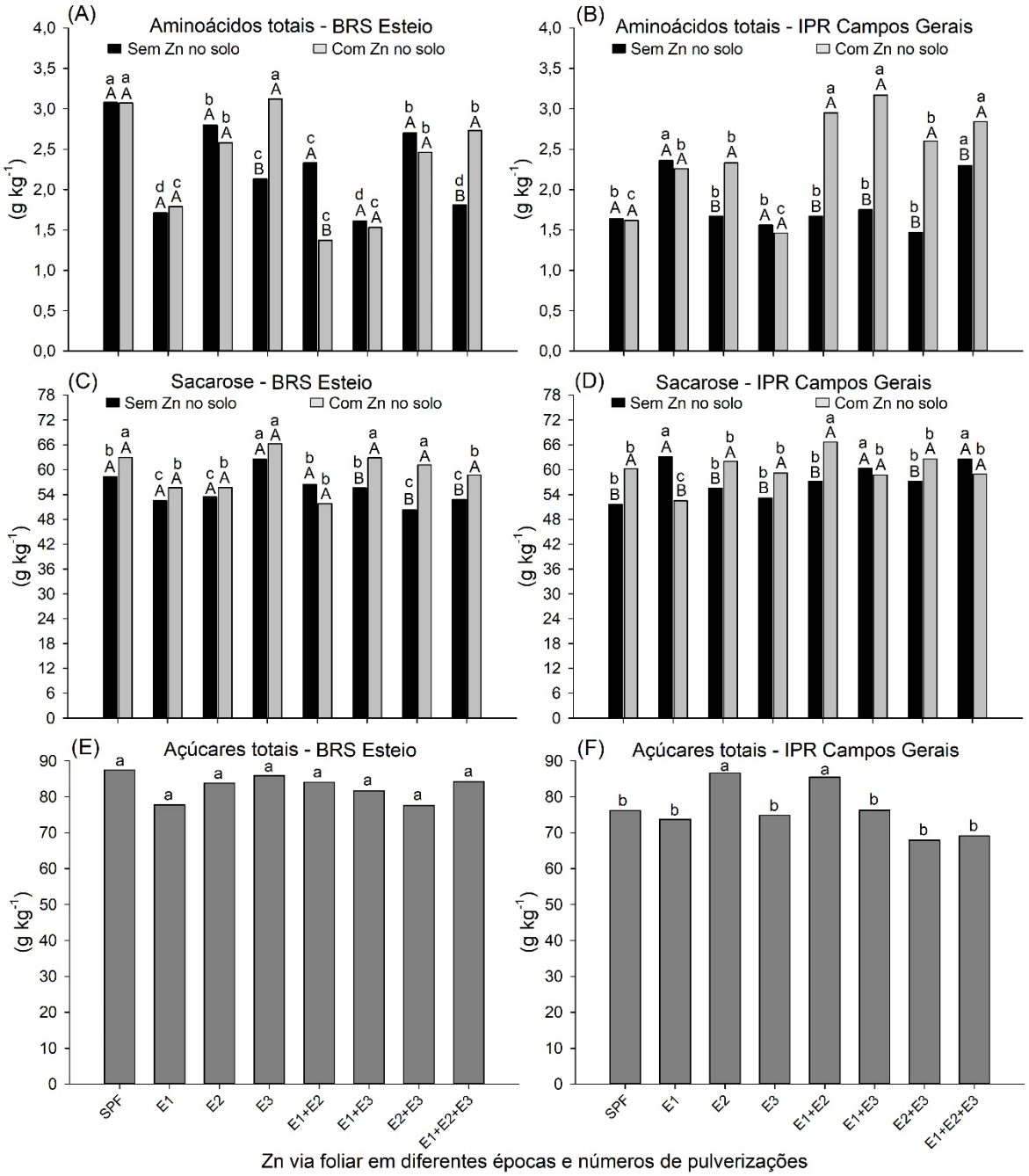

Figura 6. Teores de aminoácidos totais (Figuras 6A e 6B) e sacarose (Figuras 6C e 6D), em função da aplicação de Zn via solo (sem e com Zn no solo) e via foliar em diferentes épocas e números de pulverizações, e teores de açúcares totais (Figuras 6E e 6F), em função da aplicação de Zn via foliar em diferentes épocas e números de pulverizações, em grãos de feijoeiro-comum 'BRS Esteio' e 'IPR Campos Gerais', na safra de verão 2017/2018.

Tratamento sem pulverização foliar (SPF); tratamentos com uma pulverização: estádio de florescimento (E1), estádio inicial de enchimento de grãos (E2) e estádio final de enchimento de grãos (E3); tratamentos com duas pulverizações: E1+E2, E1+E3 e E2+E3; tratamento com três pulverizações: E1+E2+E3.

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si (Scott-Knott, $p < 0,05$). Quando houve interação entre os fatores (Figuras 6A, 6B, 6C e 6D), letra minúscula compara os tratamentos de doses de Zn via foliar dentro de cada tratamento de doses de Zn via solo, e letra maiúscula compara os tratamentos de doses de Zn via solo dentro de cada tratamento de doses de Zn via foliar.

Comparando com o tratamento que não recebeu pulverização foliar (SPF), verificou-se que a pulverização de Zn via foliar durante o florescimento (E1) tendeu a reduzir e a elevar os teores de aminoácidos totais da cultivar BRS Esteio (Figura 6A) e da cultivar IPR Campos Gerais (Figura 6B), respectivamente, destacando-se que comportamento parecido foi observado para a produtividade de grãos.

Por outro lado, sem Zn no solo, a aplicação foliar de Zn no estágio de enchimento de grãos (E2 e E3) resultou em menor magnitude de variação de teores de aminoácidos totais. Porém, com Zn no solo, a cultivar IPR Campos Gerais apresentou maiores teores de aminoácidos totais nos tratamentos E2, E1+E2, E1+E3, E2+E3 e E1+E2+E3 (Figura 6B). Assim, a associação da fertilização de Zn via solo com a pulverização foliar favoreceu, em geral, o aumento de teores de aminoácidos totais nos grãos da cultivar IPR Campos Gerais.

Quanto aos teores de sacarose nos grãos, com Zn no solo, em geral, houveram aumentos significativos com os tratamentos E1+E3, E2+E3 e E1+E2+E3 na cultivar BRS Esteio (Figura 6C), e nos tratamentos SPF, E1, E2, E3, E1+E2, E2+E3 na cultivar IPR Campos Gerais (Figura 6D).

A aplicação de Zn via foliar no estádio inicial de enchimento de grãos (E2) não afetou significativamente os teores de açúcares totais nos grãos da cultivar BRS Esteio (Figura 6E), mas elevou estes teores na cultivar IPR Campos Gerais (Figura 6F).

Comparando as duas safras para a cultivar BRS Esteio em estádio de enchimento de grãos (E2), na safra 2016/2017 (Figura 5) a dose 600 g ha^{-1} de Zn via foliar não afetou os teores de aminoácidos e açúcares totais e aumentou os teores de sacarose, enquanto que na safra 2017/2018 (Figuras 6A, 6C e 6E) houve apenas variações de baixa magnitude para essas três variáveis resposta. Assim, exceto para o teor de sacarose, houve certa similaridade de comportamento entre as duas safras quanto à aplicação foliar de Zn.

Barrameda-Medina et al. (2017), em trabalho de biofortificação com Zn em brócolis, utilizando doses foliares de 10, 20, 40, 80 e 100 mmol g^{-1} de $ZnSO_4.7H_2O$, verificaram maior acúmulo de aminoácidos totais nas partes comestíveis das plantas com o aumento das doses de Zn. A sacarose é uma importante forma de açúcar presente no feijoeiro-comum, além de ser conhecida como protetora das células contra agentes oxidativos (ANDRADE et al., 2016). Previamente, foi relatado que o Zn é fundamental para a biossíntese de sacarose em milho (SHROTRI; TEWARI; RATHORE, 1980) e a aplicação foliar de Zn resultou em aumentos de teores de açúcares totais em *Vigna mungo* (PANDEY; GUPTA; PATHAK, 2013).

Quanto às proteínas de reserva dos grãos (albuminas, globulinas, prolaminas e glutelinas) da cultivar BRS Esteio, cultivada na safra 2016/2017, verificou-se que a dose de 600 g ha^{-1} de Zn via foliar foi a que melhor respondeu aumento de teores de proteínas nos grãos (Figura 7). Os teores de albuminas foram maiores nas doses 300 e 600 g ha^{-1} de Zn ($p < 0,001$, Figura 7A), os teores de globulinas e glutelinas aumentaram a partir da dose 600 g ha^{-1} de Zn ($p < 0,001$, Figuras 7B e 7D), e os teores de prolaminas não tiveram variações significativas ($p > 0,05$, Figura 7C).

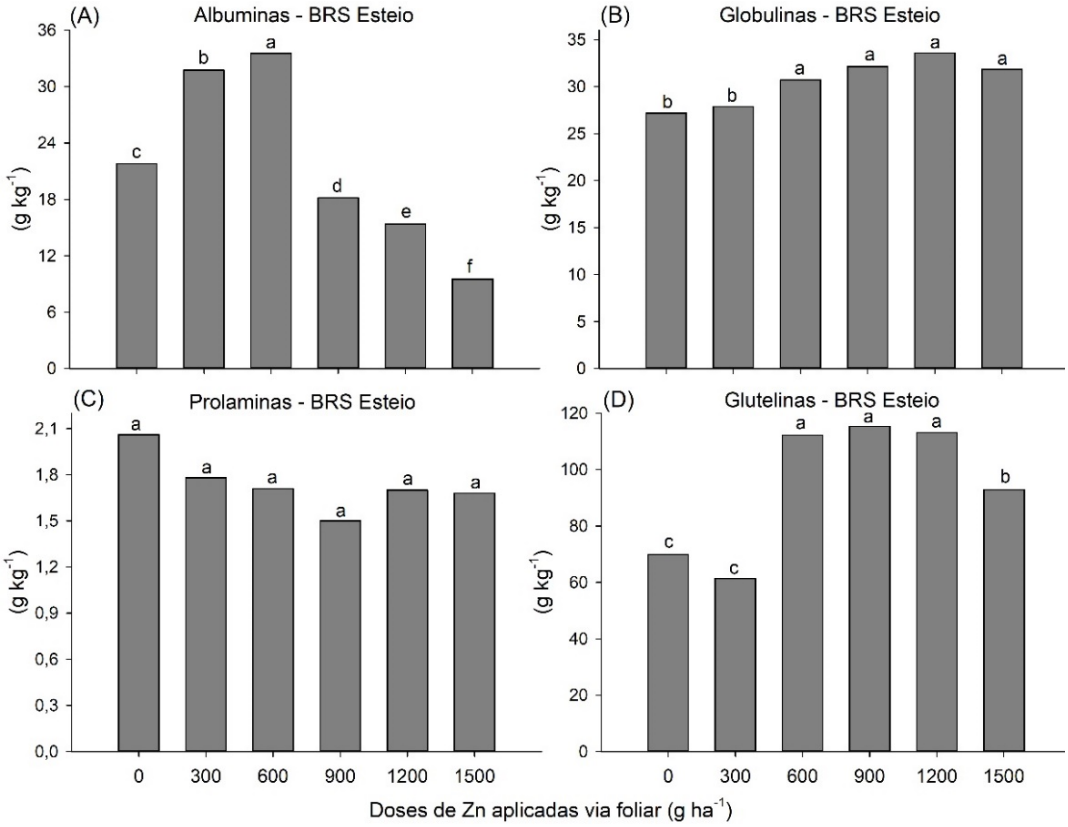

Figura 7. Teores de proteínas de reserva, albuminas (Figura 7A), globulinas (Figura 7B), prolaminas (Figura 7C) e glutelinas (Figura 7D) nos grãos em feijoeiro-comum 'BRS Esteio', em função da aplicação de doses de Zn via foliar (0, 300, 600, 900, 1200 e 1500 g ha^{-1}) no estádio inicial de enchimento de grãos, na safra de verão 2016/2017.
Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si (Scott-Knott, $p < 0,05$).

A Figura 8 apresenta os dados para proteínas de reserva dos grãos para as cultivares BRS Esteio e IPR Campos Gerais, cultivadas na safra 2017/2018. Para ambas as cultivares, houve efeito significativo da interação entre os fatores (Zn via solo × Zn via foliar, com $p < 0,001$) para as quatros variáveis de proteínas de reserva estudadas.

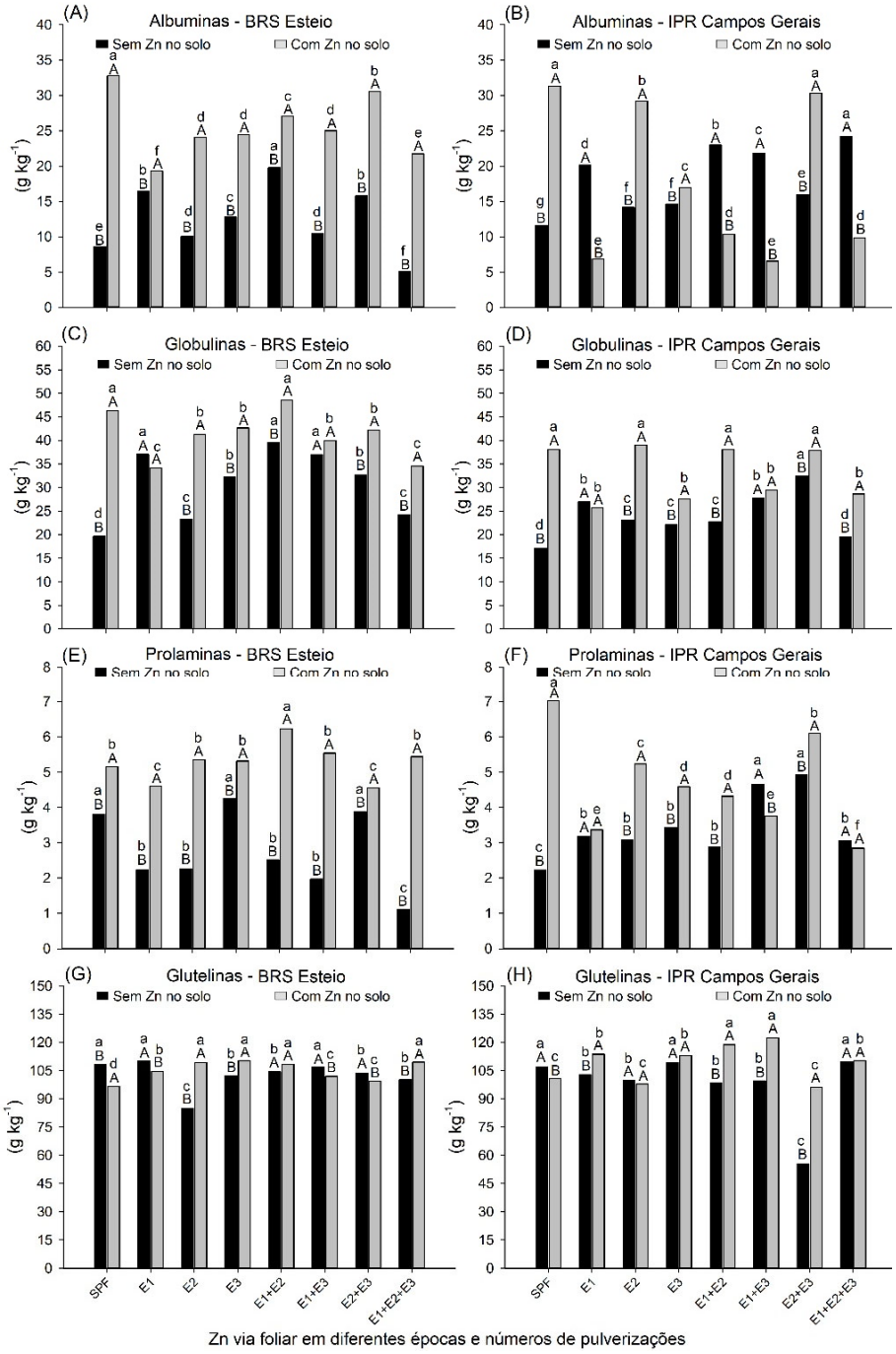

Figura 8. Teores de proteínas de reserva albuminas (Figuras 8A e 8B), globulinas (Figuras 8C e 8D), prolaminas (Figuras 8E e 8F) e glutelinas (Figuras 8G e 8H) nos grãos em feijoeiro-comum 'BRS Esteio' e 'IPR Campos Gerais', em função da aplicação de Zn via solo (sem e com Zn no solo) e via foliar em diferentes épocas e números de pulverizações, na safra de verão 2017/2018.

Tratamento sem pulverização foliar (SPF); tratamentos com uma pulverização: estádio de florescimento (E1), estádio inicial de enchimento de grãos (E2) e estádio final de enchimento de grãos (E3); tratamentos com duas pulverizações: E1+E2, E1+E3 e E2+E3; tratamento com três pulverizações: E1+E2+E3.

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si (Scott-Knott, $p < 0,05$). Letra minúscula compara os tratamentos de doses de Zn via foliar dentro de cada tratamento de doses de Zn via solo, e letra maiúscula compara os tratamentos de doses de Zn via solo dentro de cada tratamento de doses de Zn via foliar.

No geral, houve efeito positivo da aplicação de Zn no solo sobre os teores das proteínas de reserva dos grãos de ambas as cultivares, especialmente sobre as albuminas (Figura 8A e 8B), globulinas (Figura 8C e 8D) e prolaminas (Figura 8E e 8F).

Sem a aplicação de Zn no solo, as pulverizações foliares em E1, E3, E1+E2, E1+E3 e E2+E3 tenderam a aumentar os teores de albuminas nos grãos de ambas as cultivares (Figuras 8A e 8B), e de globulinas para a cultivar BRS Esteio (Figura 8C). No entanto, para esta cultivar, as pulverizações foliares em E1 e E2 no tratamento sem Zn no solo reduziu os teores de prolaminas dos grãos (Figura 8E). Em geral, não ficou caracterizado um efeito "aditivo" da aplicação de Zn foliar em mais de uma época sobre os teores de proteínas de reserva.

Ainda sem a aplicação de Zn no solo, comparando o efeito da dose 600 g ha^{-1} de Zn via foliar na cultivar BRS Esteio em estádio de enchimento de grãos (E2) nas duas safras estudadas, verifica-se que na primeira safra (2016/2017) (Figura 7) a pulverização foliar de Zn aumentou de forma mais evidente os teores das proteínas de reserva dos grãos. Na segunda safra (2017/2018), para as albuminas e globulinas (Figuras 8A e 8C), os efeitos foram mais pronunciados quando se realizou pelo menos uma aplicação foliar no estádio de florescimento (E1).

Por fim, neste estudo foi evidente que a aplicação de Zn no sulco de semeadura foi eficiente em aumentar os teores das proteínas de reserva nos grãos de feijão. A adubação via solo permite o fornecimento de nutrientes de forma lenta e gradual que, provavelmente, favoreceu o efeito do Zn sobre o metabolismo da planta ao longo do ciclo. O Zn é fundamental na síntese proteica devido à sua atuação no funcionamento e estabilidade do material genético. Nesse caso, seu papel se torna imprescindível no metabolismo do DNA/RNA, na disposição da cromatina e expressão genética (MARSCHNER, 2012), em que é componente da RNA polimerase na regulação dos ribossomos (TAIZ E ZEIGER, 2004), e atua na atividade da enzima RNAse que hidrolisa o RNA, mantendo a regulação da síntese proteica (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Além dessa função, o Zn atua na síntese do aminoácido triptofano, precursor do ácido indol-3-acético (AIA) (BROADLEY et al., 2007).

Por outro lado, a pulverização foliar foi efetiva em enriquecer os grãos de feijoeiro com Zn, melhorando a qualidade nutricional nesse quesito. Assim, a aplicação foliar no estádio de enchimento de grãos permitiu a translocação do nutriente das folhas para os grãos, porém, o baixo efeito residual das adubações foliares possivelmente resultou em menor tempo de ação do Zn aplicado sobre a síntese proteica nos tecidos foliares da planta.

O consumo de feijão é uma importante fonte de proteínas para a população, principalmente a de baixa renda (BLAIR, 2013). As albuminas, globulinas e glutelinas são as frações proteicas encontradas em maior teor nos grãos de feijão (MONTOYA et al., 2010), sendo que as proporções de cada uma dessas frações variam conforme a cultivar e condições edafoclimáticas. Neste trabalho foi observado maior proporção de glutelinas, seguidas por globulinas, albuminas e, em proporção bem menor, as prolaminas, corroborando com os resultados encontrados em outras pesquisas com cultivares de feijoeiro-comum do Brasil (NEVES; SILVA; DA SILVA, 2006; GOMES JUNIOR; SÁ, 2010; OLIVEIRA et al., 2017). De acordo com Marquez e Lajolo (1990), as albuminas e glutelinas do grão de feijão apresentam menor digestibilidade no organismo humano que as globulinas.

4.6. Conclusões

A cultivar BRS Esteio apresentou maior capacidade de enriquecimento dos grãos com Zn que a cultivar IPR Campos Gerais, havendo, portanto, variação genotípica.

A biofortificação dos grãos de feijão com Zn foi mais eficiente com a pulverização foliar que em relação ao fornecimento via solo, na dose de 600 g ha^{-1} de Zn, no estádio inicial de enchimento de grãos, considerando as cultivares testadas e as condições edafoclimáticas da região de estudo.

No estádio final de enchimento de grãos, a pulverização foliar de Zn favoreceu o aumento de teor de Zn nas vagens em detrimento do teor de Zn nos grãos.

A aplicação de Zn (4 kg ha^{-1}) no sulco de semeadura junto com a adubação NPK favoreceu o aumento de teores de aminoácidos totais e das proteínas de reserva albuminas, globulinas e prolaminas nos grãos de feijão.

4.7. Referências Bibliográficas

ABREU, J. A. A. et al. Zinco: necessário para a produção de milho em solo de várzea (Iranduba) Amazonas. **Revista Igapó-Revista de Educação Ciência e Tecnologia do IFAM**, v. 10, n. 2, p. 120-134, 2016.

ANDRADE, E. R. et al. Biochemical indicators of drought tolerance in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Euphytica**, v. 210, n. 2, p. 277-289, 2016.

BARRAMEDA-MEDINA, Y. et al., “Zinc biofortification improves phytochemicals and amino-acidic profile in Brassica oleracea cv. Bronco”. **Plant Science**, v. 258, p. 45–51, 2017.

BHATTACHARJEE, S. Sites of generation and physicochemical basis of formation of reactive oxygen species in plant cell. In: GUPTA, S.D. **Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants**. Enfi eld: Science Publishers, 2010. p.1-30.

BIELESKI, R. L.; TURNER, N. A. Separation and estimation of amino acids in crude plant extracts by thin-layer electrophoresis and chromatography. **Analytical Biochemistry**, v. 17, p. 278-293, 1966.

BLACK, R. E. et al. Maternal and child undernutrition: global and regional exposures and health consequences. **Lancet**, v. 371, p. 243–260, 2008.

BLAIR, M. W. Mineral biofortification strategies for food staples: the example of common bean. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 35, p. 8287-8294, 2013.

BOUIS, H. Reducing mineral and vitamin deficiencies through biofortification: progress under HarvestPlus. **In: Hidden Hunger:** Strategies to Improve Nutrition Quality. Karger Publishers, 2018. p. 112-122.

BRADFORD, M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, p. 248-259, 1976.

BRITO MELO, F. de. et al. Resposta do feijão-caupi à aplicação de fósforo e zinco. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 1, p. 240-245, 2017.

BROADLEY, M. et al. Zinc in plants. **New Phytologist**, v. 173, p. 677-702, 2007.

BROWN, K. H. et al. Effect of supplemental zinc on the growth and serum zinc concentrations of prepubertal children: A meta-analysis of randomized controlled trials, **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 75, p. 1062–1071, 2002.

CAKMAK, I. et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 58, n. 16, p. 9092-9102, Aug. 2010.

CAMBRAIA, T. L. L. **BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO FEIJÃO PELO MANEJO DA ADUBAÇÃO COM Zn.** 2015. 49 p. Dissertação (Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2015.

CASTRO-GUERRERO, N. A. et al. Common bean: A legume model on the rise for unraveling responses and adaptations to iron, zinc, and phosphate deficiencies. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 600, 2016.

CHASAPIS, C. T. et al. E. Zinc and human health: an update. **Archives of toxicology**, v. 86, n. 4, p. 521-534, 2012.

CORGUINHA, A. P. B.; Zinc biofortification of cassava through agronomic management in Brazil. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 27S1, p. 48-48, 2013.

DUARTE, R. F. et al. Rice fortified with zinc through parboiled process. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, Amsterdam, v. 27, p. 24-24, 2013.

DUBOIS, M. et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry** v. 28, p. 350-356, 1956.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, Embrapa informação tecnológica, 2009. 627p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017. 575 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Soluções tecnológicas – Feijão BRS Esteio**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/2044/feijao---brs-esteio>. Acesso em 20 abr. 2019.

FERNÁNDEZ DE CÓRDOVA, F.; GEPTS, P. L.; LÓPEZ GENES, M. **Etapas de desarrollo de la planta de frijol comúm (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 1986. 34 p.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

FIGUEIREDO, M. A. de. **Biofortificação com zinco, selênio e ferro, e biodisponibilidade de ferro em cultivares de feijoeiro-comum**. 2016. 136 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras.

GIBSON, R. Zinc deficiency and human health: etiology, health consequences, and future solutions. Plant Soil, Netherlands, v. 361, p. 291-299, mar. 2012.

GOMES JUNIOR, F. G.; SÁ, M. E. D. Proteína e qualidade de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em função da adubação nitrogenada em plantio direto, **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, n. 1, p. 34–44, 2010.

HOCKING, P. J.; PATE, J. S. Mobilization of minerals to developing seeds of legumes. **Annals of Botany**, v. 41, p. 1259-1278, 1977.

IAPAR – INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Principais características das cultivares de feijão com sementes disponíveis no mercado**. Disponível em: http://www.iapar.br/pagina-1363.html>. Acesso em 20 abr. 2019.

KOBRAEE, S.; SHAMSI, K. Measurement of zinc, iron and manganese ratios in different parts of soybean plant. **Research on Crops**, v. 12, n. 3, p. 761-765, 2011.

LEVENSON, C. W.; MORRIS, D. Zinc and neurogenesis: making new neurons from development to adulthood. **American society of nutrition**, Bethesda, v. 2, p. 96-100, 2011.

LIVINGSTONE C. Zinc: Physiology, deficiency, and parenteral nutrition. **Nutrition in Clinical Practice**, v. 30, n. 3, p. 371–382, jun. 2015.

LOPES, A. S.; GUIMARÃES GUILHERME, L. R. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v. 137, p. 1-72, 2016.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicação. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.

MARQUES, M. F.; MARQUES, M. M.; XAVIER, E. R. Fortificação de alimentos: uma alternativa para suprir as necessidades de micronutrientes no mundo contemporâneo. **HU Revista**, v. 38, n. 1 e 2, p. 29-36, 2012.

MARQUEZ, U. M. L.; LAJOLO, F. M. Nutritional value of cooked beans (Phaseolus vulgaris) and their isolated major protein fractions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 53, n. 2, p. 235-242, 1990.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. **Academic Press**, 3ª Ed. London, 2012. 651p.

MOLOTO, R. M. et al. Biofortification of common bean as a complementary approach to addressing zinc deficiency in South Africans, **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, vol. 68, nº 7, p. 575–584, out. 2018.

MONTOYA, C. A. et al. Phaseolin diversity as a possible strategy to improve nutritional value of common beans (*Phaseolus vulgaris*). **Food Research International**, Essex, v. 43, p. 443-449, 2010.

MORI, R. et al. Zinc supplementation for improving pregnancy and infant outcome. **Cochrane Database of Systematic Reviews**, n. 7, 2012.

MORRIS, J. S.; CRANE, S. B. Selenium toxicity from a misformulated dietary supplement, adverse health effects, and the temporal response in the nail biologic monitor. **Nutrients**, Basel, v. 5, n. 4, p. 1024-1057, Mar. 2013.

NEVES, V. A.; SILVA JR, S. I.; DA SILVA, M. A. Isolamento da globulina majoritária, digestibilidade in vivo e in vitro das proteínas do tremoço-doce (*Lupinus albus* L.), var. multolupa. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 26, n. 4, p. 832-840, 2006.

OLIVEIRA, A. P. et al. Protein and Metalloprotein Distribution in Different Varieties of Beans (*Phaseolus vulgaris* L.): Effects of Cooking, **International Journal of Food Science**, p. 1-8, 2017.

PANDEY, N.; GUPTA, B.; PATHAK, G. C. Foliar application of Zn at flowering stage improves plant's performance, yield and yield attributes of black gram. **Indian Journal of Experimental Biology**, v. 51, p. 548-555, 2013.

PAVAN, M. A. et al. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. Londrina: IAPAR, 1992. 40 p. (IAPAR. Circular 76).

PEDRAZA, D. F.; DANTAS ROCHA, A. C. Deficiências de micronutrientes em crianças brasileiras assistidas em creches: revisão da literatura. **Revista Ciência & Saúde Coletiva**, v. 21, n. 5, 1525-1543, 2016.

PEREIRA, H. S. et al. **BRS Esteio – Cultivar de feijoeiro-comum com grãos pretos, alto potencial produtivo e resistência à antracnose**, Santo Antônio de Goiás-GO, Embrapa Arroz e Feijão, agrosto 2013, 4p. (Embrapa Arroz e Feijão. Comunicado Técnico, 213).

PRASAD, A. S. Discovery of human zinc deficiency: Impact on human health. **Nutrition**, v. 17, p. 685–687, 2001.

PRASAD, R.; SHIVAY, Y. S.; KUMAR, D. Agronomic biofortification of cereal grains with iron and zinc. In: **Advances in Agronomy**. Academic Press, 2014. p. 55-91.

QASWAR, M.; HUSSAIN, S.; RENGEL, Z. Zinc fertilisation increases grain zinc and reduces grain lead and cadmium concentrations more in zinc-biofortified than standard wheat cultivar. **Science of The Total Environment**, v. 605, p. 454-460, 2017.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.r-project.org/, 2016.

RAM, H. et al. Biofortification of wheat, rice and common bean by applying foliar zinc fertilizer along with pesticides in seven countries. **Plant and soil**, v. 403, n. 1-2, p. 389-401, 2016.

SAHA, S. et al. Agronomic biofortification of zinc in rice: Influence of cultivars and zinc application methods on grain yield and zinc bioavailability. **Field Crops Research**, v. 210, p. 52-60, 2017.

SBCS – SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO / NÚCLEO ESTADUAL PARANÁ. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017. 482 p.

SCALCO, M. S. et al. Teores foliares de fósforo e zinco, produtividade e crescimento de café irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 2, p. 95-101, 2014.

SHAHZAD, Z.; ROUACHED, H.; RAKHA, A. Combating mineral malnutrition through iron and zinc biofortification of cereals. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 13, n. 3, p. 329-346, 2014.

SHROTRI, C.; TEWARI, M. N.; RATHORE, V. S. Effect of zinc nutrition on sucrose biosynthesis in maize. **Phytochemistry**, v. 19, n. 1, p. 139-140, 1980.

SOUZA, G. A. et al. Evaluation of germplasm effect on Fe, Zn and Se content in wheat seedlings. **Plant Science**, v. 210, p. 206– 213, 2013.

SOUZA, G. A. et al. Genotypic variation of zinc and selenium concentration in grains of Brazilian wheat lines. **Plant Science**, v. 224, p. 27-35, 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

VAN HANDEL, E. Direct microdetermination of sucrose. **Analytical Biochemistry**, v. 22, p. 280-283, 1968.

VELU, G. et al. Biofortification strategies to increase grain zinc and iron concentrations in wheat. **Journal of Cereal Science**, v. 59, n. 3, p. 365-372, 2014.

YEMM, E. W.; COCKING, E. C. The Determination of Amino Acids with Ninhydrin. **Analyst**, v. 80, p. 209-213, 1955.

5. CAPÍTULO 3 – NUTRIÇÃO, PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES EM FEIJOEIRO-COMUM SOB FERTILIZAÇÃO DE ZINCO EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

5.1. Resumo – O zinco (Zn) é um dos micronutrientes mais deficientes nos solos do Brasil. Objetivou-se neste estudo avaliar a nutrição, produção de grãos e exportação de nutrientes em função da fertilização de Zn em feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado sob sistema de plantio direto (SPD). Dois experimentos de campo foram conduzidos na safra de verão 2017/2018, usando a cultivar IPR Campos Gerais (grupo de feijão carioca) e a cultivar BRS Esteio (grupo de feijão preto). Os tratamentos foram compostos pela aplicação de Zn no solo durante a semeadura e pela pulverização foliar de Zn no estádio fenológico de florescimento. A aplicação de Zn no solo teve efeito sobre o teor foliar de Zn da cultivar IPR Campos Gerais e não afetou a produtividade de grãos de ambas as cultivares. Contudo, a pulverização foliar de Zn no estádio fenológico de florescimento elevou em, aproximadamente, duas vezes o teor foliar de Zn em ambas as cultivares de feijoeiro-comum, porém, afetou negativamente a produtividade de grãos na cultivar BRS Esteio. Os teores foliares de N, Ca, S e Mn foram afetados pela aplicação de Zn no solo e, ou, foliar, enquanto que os teores foliares de P, K, Mg, Cu e Fe não foram influenciados pelos tratamentos. Considerando os tratamentos sem aplicação de Zn via solo ou foliar, as exportações de nutrientes da área com a colheita dos grãos obedeceram à ordem para os macronutrientes N > K > P > Ca ≈ S > Mg e à ordem para os micronutrientes Fe > Mn > Cu > Zn. A pulverização foliar de Zn elevou as exportações de Zn, P, Ca, Mg, S, Mn, Cu e Fe nos grãos da cultivar IPR Campos Gerais, enquanto que a aplicação de Zn no solo resultou em maior exportação de P, K e Mn nos grãos da cultivar BRS Esteio.

Palavras-Chave: *Phaseolus vulgaris* L., solo tropical, micronutriente, produtividade de grãos

PLANT NUTRITION, YIELD AND NUTRIENT EXPORT IN COMMON BEAN UNDER ZINC FERTILIZATION IN NO-TILL SYSTEM

5.2. Abstract – Zinc (Zn) is one of the most deficient plant micronutrients in agricultural crops. The objective of this study was to evaluate nutrition, physiological characteristics, grain yield and nutrient export as a function of Zn fertilization in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Two field experiments in no-till system were carried out in the 2017/2018 summer harvest in an area with weathered soil (oxisol) of very clayey texture at the subtropical region of Brazil. Two common bean cultivars were used: BRS Esteio (black bean) and IPR Campos Gerais (Carioca bean). The treatments were composed of Zn soil application during sowing and Zn foliar spray at the flowering stage. Zn soil application had effect on Zn leaf content of the cultivar IPR Campos Gerais and did not affect grain yield in both cultivars. However, Zn foliar spray at the flowering time (phenological stage R6) increased leaf Zn content by approximately two times in both common bean cultivars, but negatively affected the grain yield in cultivar BRS Esteio. N and S foliar contents were affected by Zn soil application and the Mn leaf content by Zn leaf spray, while the P, K, Mg, Cu and Fe leaf contents were not influenced by the treatments. In treatments without both Zn soil application and Zn foliar spray, the descending order of nutrient export from the field was as follows: N > K > P > Ca ≈ S > Mg for macronutrients and Fe > Mn > Cu > Zn for micronutrients. Zn foliar spray increased the Zn, P, Ca, Mg, S, Mn, Cu and Fe exports in grains of the cultivar IPR Campos Gerais, while Zn soil application resulted in higher P, K and Mn exports in grains of the cultivar BRS Esteio.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L., tropical soil, micronutrient, grain yield

5.3. Introdução

Assim como para os animais e humanos, o zinco (Zn) é um micronutriente para os vegetais. Entretanto, estima-se que 50 % dos solos cultivados para produção de grãos são deficientes em Zn (RAM et al., 2016); pois, parte do Zn total do solo (30 a 60 %) pode estar em formas não disponível, ficando aprisionado na matéria orgânica e adsorvido de forma específica nos coloides minerais (ALONSO et al., 2006). No Brasil, por exemplo, o Zn é o micronutriente de planta mais deficiente nos solos em condições naturais, especialmente na região do Cerrado (LOPES; GUILHERME, 2016).

A dinâmica e a disponibilidade de Zn no solo para as plantas são afetadas por diferentes fatores inerentes ao solo (granulometria, pH, teor de matéria orgânica, umidade, temperatura, o próprio teor de Zn total e as características químicas, físicas e mineralógicas), à planta (localização das raízes e efeito rizosférico) e aos adubos utilizados no manejo (tipos e formas de aplicação dos adubos, íon acompanhante do Zn e possíveis contaminantes presentes) (HAN et al., 2011).

No metabolismo vegetal, o Zn apresenta papel de destaque na ativação de enzimas, regulação e expressão gênica, síntese de proteína, metabolismo de carboidratos, fotossíntese, atuação de fitohormonios, fertilidade, regulação de crescimento, produção de sementes e na defesa contra doenças (MARSCHNER, 2012; REHMAN et al., 2018). Dentre as enzimas, o Zn atua na atividade de várias, como a RNA polimerase, anidrase carbônica, álcool desidrogenase, glutamato desidrogenase, Cu-Zn-SOD e a fosfomanose isomerase, demonstrando ainda mais a sua essencialidade dentro do metabolismo vegetal (MOREIRA; MORAES; REIS, 2018).

Pelos efeitos impostos na fotossíntese e na conversão do açúcar, o Zn atua essencialmente no metabolismo dos carboidratos. A diminuição da atividade fotossintética pode ocorrer devido à queda da ação da anidrase carbônica (inibindo a transferência de elétrons fotossintéticos), da ação fotoquímica dos cloroplastos e do conteúdo de clorofila, e também modificações na estrutura do cloroplasto, que podem ser consequências advindas da deficiência de Zn nas plantas (SADEGHZADEH, 2013). Ainda, o mesmo autor cita que a baixa disponibilidade de Zn no solo para as plantas acarreta em drásticas perdas de qualidade nutricional dos grãos e de rendimento de produção.

Os grãos de feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) representam quase metade do consumo de leguminosas no mundo, sendo uma importante fonte de proteínas, energia e nutrientes para a população de baixa renda, principalmente na África e na América Latina (WELCH et al., 2000; BROUGHTON et al., 2003; BLAIR et al., 2010; BLAIR, 2013). No Brasil, é cultivada uma ampla variedade de grupos comerciais de feijoeiro-comum, como carioca, preto, rosinha, roxo, entre outras (PEREIRA et al., 2012). Entretanto, o mercado consumidor brasileiro tem preferência de, aproximadamente, 70 % para o feijão carioca e 20 % para o feijão preto (DEL PELOSO; MELO, 2005; BRASIL, 2008).

Atualmente, aproximadamente 90 % das culturas de grãos no Estado do Paraná do Brasil são manejadas em sistema de plantio direto. Em relação ao sistema de cultivo convencional, no sistema de plantio direto o revolvimento do solo é restrito, sendo o calcário geralmente aplicado em superfície sem incorporação no solo, alterando a dinâmica da acidez, da matéria orgânica e, consequentemente, da disponibilidade dos nutrientes entre as camadas superficiais e subsuperficiais do solo (FONSECA; CAIRES; BARTH, 2010; VIEIRA et al., 2016).

A exigência em micronutrientes pelas lavouras agrícolas tem aumentando devido aos maiores índices de produtividade associado com a intensificação do cultivo na área, além da utilização de fertilizantes NPK mais concentrados e puros, com baixa percentagem de nutrientes secundários, dentre estes o Zn. Ainda, tem-se poucos estudos de campo que envolvem o Zn e o feijoeiro-comum, especialmente na região Sul do Brasil. Assim, acredita-se que com a aplicação de Zn em feijoeiro cultivado em sistema de plantio direto pode-se obter respostas fisiológicas importantes para melhora do manejo da cultura.

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da fertilização foliar e via solo de Zn sobre a nutrição, produtividade de grãos e exportação de nutrientes da área com a colheita dos grãos em duas cultivares de feijoeiro-comum amplamente cultivadas na região Sul do Brasil, a cultivar BRS Esteio (pertencente ao grupo de feijão preto) e a cultivar IPR Campos Gerais (pertencente ao grupo de feijão carioca).

5.4. Material e Métodos

5.4.1. Descrição da área experimental e instalação dos experimentos

Este estudo foi realizado na área experimental do *Campus* Cedeteg da UNICENTRO (Universidade Estadual do Centro-Oeste), situado na cidade de Guarapuava, Estado do Paraná, Brasil (25°23'2"S, 51°29'43"O e 1026 m de altitude). Na região predomina o clima temperado de altitude (Cfb) conforme a classificação de Köppen-Geiger, sendo que as temperaturas médias nos meses mais frio e mais quente são menores que 18 e 22 ºC, respectivamente, não havendo estação seca definida.

As médias semanais de precipitação pluviométrica e temperatura na área experimental durante o período de condução dos experimentos (entre 18 de dezembro de 2017 a 5 de abril de 2018) foram obtidos da estação meteorológica da rede do Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), situada a 50 m do experimento (Figura 9). Em geral, as condições de pluviosidade e de temperatura foram adequadas para o cultivo do feijoeiro-comum na região Sul do Brasil.

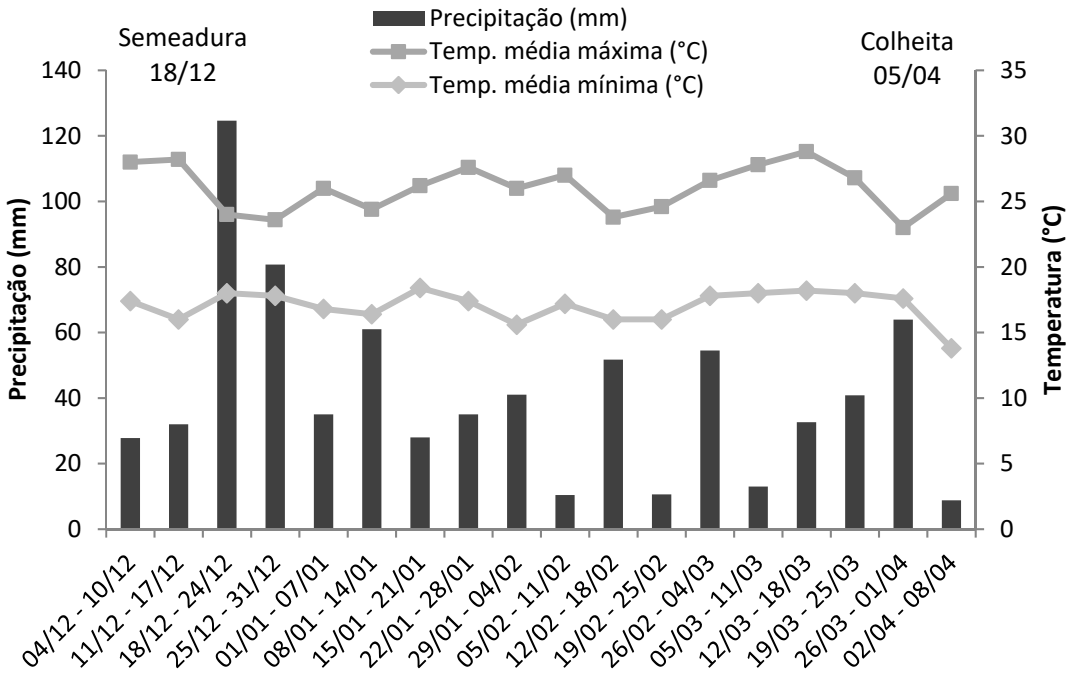

Figura 9. Valores semanais de precipitação pluviométrica e temperatura média máxima e mínima na área durante o período de condução dos experimentos que ocorreu entre 18 de dezembro de 2017 a 5 de abril de 2018.
Fonte: Estação Meteorológica da Rede do Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), 2018.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Bruno distrófico de textura muito argilosa (MICHALOVICZ, 2012). Os resultados da análise química do solo, na camada de 0-20 cm de profundidade, coletado previamente à instalação dos experimentos, encontra-se na Tabela 3. As análises químicas foram determinadas conforme a metodologia oficial para o Estado do Paraná (PAVAN et al., 1992; EMBRAPA, 2009). O P e os micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn) foram extraídos por Mehlich-1 e o S-SO_4^{2-} por fosfato de cálcio 0,01 mol L^{-1} (CANTARELLA; PROCHNOW, 2001). A calagem foi feita visando elevar a saturação de bases (V %) para 70 % e ajustar a relação entre os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} para quatro.

Tabela 3. Análise química do solo da área experimental em amostra composta da camada de 0-20 cm de profundidade.

pH	P (Mehlich-1)	S-SO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al^{3+}	H+Al
------$CaCl_2$------	----------mg dm^{-3}---------		----------$cmol_c$ dm^{-3}----------				
5,06	5,85	8,46	0,50	4,41	1,30	0,0	4,34
CTC (pH 7)	V	MO		Zn	Fe	Mn	Cu
---$cmol_c$ dm^{-3}---	-------%------	--------g kg^{-1}--------		----------mg dm^{-3}----------			
10,25	57,6	41,03		9,86	68,79	74,44	2,46

Fonte: Laboratório de Solos e Nutrição Mineral de Plantas – *Campus* Cedeteg, UNICENTRO, 2018.

Em 18 de dezembro de 2017, dois experimentos de campo com feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) foram instalados e conduzidos simultaneamente na área supracitada. Um experimento foi conduzido com o feijoeiro-comum cultivar BRS Esteio, pertencente ao grupo de feijão preto, e outro experimento com o feijoeiro-comum cultivar IPR Campos Gerais, pertencente ao grupo de feijão carioca, sendo que ambas as cultivares apresentam ciclo médio de 88 dias (EMBRAPA, 2019; IAPAR, 2019) (Figura 10). Ambos os experimentos receberam os mesmos tratamentos.

Usou-se o espaçamento entrelinhas de 50 cm e 12 plantas por metro linear, resultando em população de aproximadamente 240 mil plantas por hectare. As adubações de plantio e cobertura, e os controles de plantas daninhas, pragas e doenças, foram feitas conforme recomendações técnicas para a cultura na região de estudo.

Figura 10. Fotografia mostrando as duas cultivares de feijoeiro-comum na área experimental, cultivada em sistema de plantio direto.
Fonte: Kachinski, 2018.

5.4.2. Tratamentos e delineamento experimental

Em cada experimento, utilizou-se o delineamento experimental em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições, e tratamentos dispostos em esquema de parcelas subdivididas, sendo as parcelas compostas por dois tratamentos de Zn via solo (sem e com 4 kg ha^{-1} de Zn aplicado na adubação de plantio) e as subparcelas compostas por dois tratamentos de Zn via foliar (sem a pulverização foliar e com pulverização na dose de 600 g ha^{-1} de Zn). Cada subparcela experimental foi constituída por 4 linhas de plantas com 5 m de comprimento.

Para a aplicação do Zn na adubação de plantio foram obtidos os adubos formulados NPK sem Zn (12-27-06) e o NPK com Zn (12-27-06 com 1 % de Zn), ambos adquiridos da empresa Yara Brasil Fertilizantes S/A, na mesma época. A dose do formulado, com e sem Zn, aplicado no sulco de semeadura foi de 400 kg ha^{-1}.

Para a pulverização foliar, utilizou-se o $ZnSO_4.7H_2O$ p.a. da marca Merck®. As doses de Zn foram aplicadas por meio de pulverizador costal, quando as plantas se encontravam no florescimento (estádio fenológico R6), usando vazão de calda de 160 L ha^{-1}. O estádio de desenvolvimento da cultura foi verificado conforme a escala do Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), descrita em Fernández et al. (1986).

Para avaliar o efeito dos tratamentos sobre o estado nutricional das plantas, após 10 dias da pulverização foliar de Zn (com as plantas iniciando o estádio fenológico R7), foi realizada a coleta de folhas, tomando-se a terceira folha com pecíolo a partir do terço médio da planta (EMBRAPA, 2009), em cerca de 30 plantas da área útil de cada subparcela, para posterior determinação dos teores de nutrientes. O experimento foi conduzido até a época de colheita dos grãos, após a maturação fisiológica (estádio fenológico R9).

5.4.3. Avaliações de produtividade de grãos, altura de inserção da primeira vagem e teores de nutrientes nas folhas e grãos

Durante a maturação dos grãos (estádio fenológico R9), a altura de inserção da primeira vagem foi avaliada por meio da medição da distância entre o colo e o ponto de inserção da primeira vagem, em 10 plantas escolhidas ao acaso na área útil de cada subparcela.

Para a colheita dos grãos, na área útil de cada subparcela experimental, foram selecionadas ao acaso três linhas com um metro linear cada e colheram-se as plantas de forma manual. A produtividade de grãos de cada metro linear colhido foi determinada (com umidade ajustada para 13 %), e estimou-se a produtividade média de grãos em kg ha^{-1}.

No Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas do *Campus* Cedeteg da UNICENTRO, as amostras de material vegetal (tanto as folhas colhidas durante o estádio de florescimento quanto as amostras de grãos colhidos no final do estádio de maturação) foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 58-60 °C até peso constante, moídas em moinho do tipo *Willey*, e armazenadas. Posteriormente, foram determinados os teores de nutrientes nos extratos obtidos após a digestão sulfúrica (N) e nítrica-perclórica (P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e Zn), conforme Embrapa (2009).

Os dados de teores de nutrientes nos grãos foram relacionados com a produtividade de grãos, sendo estimada a exportação de nutrientes da área experimental com a colheita dos grãos (em kg ha^{-1} para os macronutrientes e g ha^{-1} para os micronutrientes).

5.4.4. Análise estatística dos dados

Foi realizada o teste de normalidade dos dados (teste de Shapiro-Wilk's, $p < 0,05$), usando-se o *software* R versão 3.5.1. (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016). Os resultados obtidos de cada experimento foram submetidos à análise de variância (ANOVA, $p \leq 0,05$) em DBC, sob esquema de parcelas subdivididas, sendo as parcelas composta pelo fator "Zn via solo" e as subparcelas compostas pelo fator "Zn via foliar", com auxílio de *software* estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011). Quando significativo, as médias foram submetidas ao teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

5.5. Resultados e Discussão

5.5.1. Produtividade de grãos e altura de inserção de primeira vagem

A produtividade de grãos do feijoeiro-comum, em ambos os experimentos, foi significativamente afetada pelo fator Zn via foliar ($p < 0,05$), porém, não foi afetada pelo fator Zn via solo ($p > 0,05$) e nem pela interação entre os fatores ($p > 0,05$) (Figura 11).

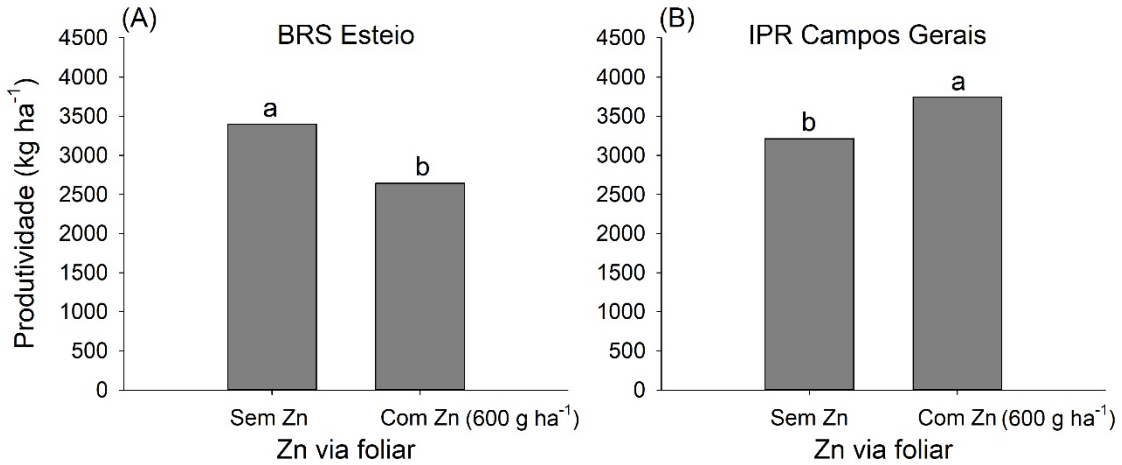

Figura 11. Produtividade de grãos em feijoeiro-comum 'BRS Esteio' (A) e 'IPR Campos Gerais' (B) em função da aplicação foliar de Zn, na safra de verão 2017/2018.
Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si (Scott-Knott, $p < 0,05$).

Comparando os tratamentos sem aplicação foliar de Zn, as médias de produtividade de grãos de feijão de ambas cultivares foram próximas, sendo 3399 e 3212 kg ha^{-1} para as cultivares BRS Esteio e IPR Campos Gerais, respectivamente. Porém, com a aplicação foliar de 600 g ha^{-1} de Zn durante o estádio de florescimento houve efeitos

divergentes sobre a produtividade de grãos entre ambas as cultivares. Para a cultivar BRS Esteio (Figura 11A), a aplicação foliar de Zn resultou em efeito tóxico, reduzindo a produtividade de 3399 para 2643 kg ha^{-1} (variação de 22 %), enquanto que para a cultivar IPR Campos Gerais (Figura 11B) a produtividade de grãos teve acréscimo, de 3212 para 3744 kg ha^{-1} (variação de 16 %). Assim, há variação genotípica quanto à resposta em produtividade do feijoeiro-comum à adubação com Zn via pulverização foliar no período de florescimento (estádio fenológico R6).

Em soja cultivada em solo da região do Cerrado do Brasil, Oliveira et al. (2017) verificaram que a aplicação de doses de Zn via solo (0, 3, 6, 9 e 12 kg ha^{-1} de Zn) durante o estádio fenológico V9 (oitava folha trifoliolada completamente desenvolvida) elevou linearmente o teor de Zn nas folhas, a massa de 1000 grãos e a produtividade de grãos com o acréscimo das doses de Zn aplicadas no solo. Em condições naturais, a maior parte dos solos encontrados no Brasil, especialmente na região do Cerrado que se destaca na produção de grãos, apresenta baixo teor de Zn disponível (LOPES; GUILHERME, 2016).

A altura de inserção de primeira vagem na cultivar BRS Esteio foi significativamente afetada pelos fatores Zn via solo ($p < 0{,}01$), Zn via foliar ($p < 0{,}001$) e pela interação entre esses fatores ($p < 0{,}05$) (Figura 12). Para a cultivar IPR Campos Gerais não houve efeito significativo dos tratamentos ($p > 0{,}05$) sobre a altura de inserção da primeira vagem, apresentando valor médio de 8,4 cm.

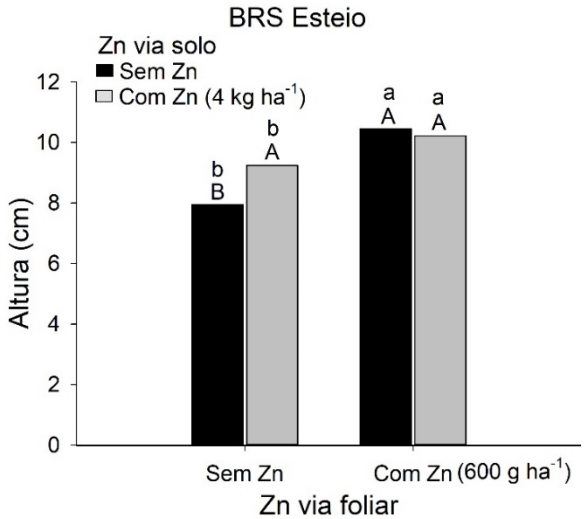

Figura 12. Altura de inserção da primeira vagem em feijoeiro-comum 'BRS Esteio' em estádio de maturação de grãos, em função da aplicação foliar e via solo de Zn, na safra de verão 2017/2018.

Médias seguidas da mesma letra, minúscula comparando os tratamentos de Zn via foliar dentro de cada tratamento de Zn via solo, e maiúscula comparando os tratamentos de Zn via solo dentro de cada tratamento de Zn via foliar, não diferem entre si (Scott-Knott, $p < 0{,}05$).

Sem a aplicação de Zn no solo, a pulverização foliar de Zn na cultivar BRS Esteio em estádio de florescimento alterou a altura de inserção da primeira vagem de 8,0 para 10,5 cm (acréscimo de 31,2 %); com a aplicação de Zn no solo, a alteração foi de 9,3 para 10,2 cm (acréscimo de 9,7 %). Assim, o efeito da pulverização foliar de Zn sobre o aumento da altura de inserção da primeira vagem desta cultivar foi mais pronunciado sem a aplicação de Zn via solo. Porém, destaca-se que, como houve uma diminuição da produtividade da cultivar BRS Esteio, acredita-se que ocorreu um possível abortamento de flores/vagens no terço inferior ("baixeiro") das plantas, alterando consequentemente a altura de inserção de vagens. No sistema mecanizado de colheita de feijão, destaca-se que a altura de inserção de primeira vagem recomendada para colheita mecânica é de no mínimo 9,3 cm (SILVA; ABREU; RAMALHO, 2009).

A adição de 4 kg ha^{-1} de Zn no sulco de semeadura também teve efeito significativo sobre a inserção da primeira vagem na cultivar BRS Esteio, porém, em menor magnitude que aquele obtido com a pulverização foliar. Sem a pulverização foliar de Zn, a aplicação de Zn no solo resultou em 16,2 % de acréscimo na altura de inserção da primeira vagem, diferentemente de quando houve pulverização foliar de Zn, pois, neste caso o efeito da aplicação de Zn no solo sobre a altura de inserção da primeira vagem foi anulado.

Assim, os efeitos da aplicação de Zn sobre altura de inserção da primeira vagem na cultura do feijoeiro-comum são influenciados pelo genótipo. Em soja, Oliveira et al. (2018) não encontraram aumento significativo da inserção de primeira vagem com aplicação de Zn, observando-se apenas variações significativas entre diferentes cultivares.

5.5.2. Teor foliar e exportação de Zn

Em ambos os experimentos, o teor foliar de Zn de ambas as cultivares de feijoeiro-comum foi afetado significativamente pelo fator Zn via foliar ($p < 0,001$). Porém, o fator Zn via solo afetou significativamente apenas o teor foliar de Zn da cultivar IPR Campos Gerais ($p < 0,05$) (Figura 13).

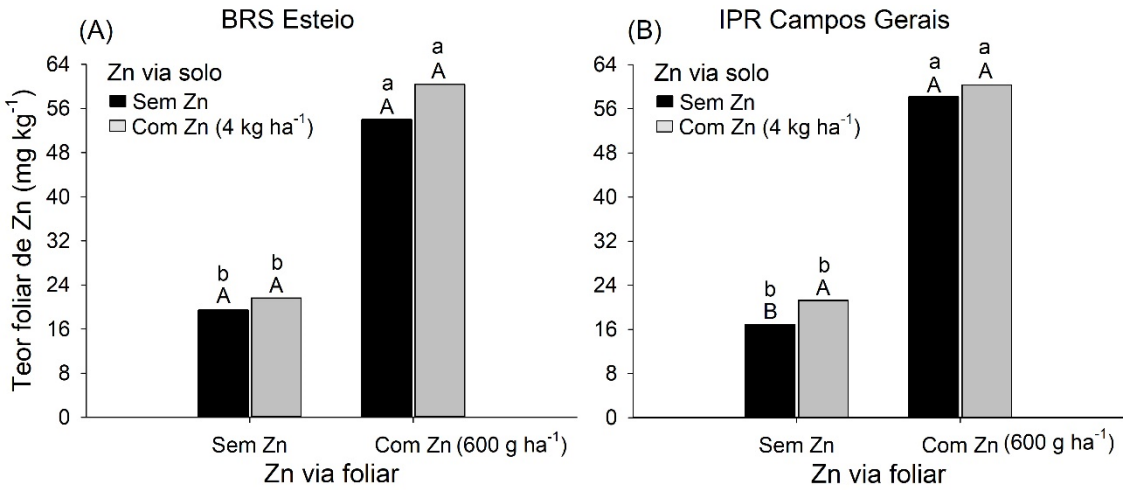

Figura 13. Teor foliar de Zn (3ªs folhas com pecíolo a partir do terço médio da planta, coletadas 10 dias após a aplicação dos tratamentos de pulverização foliar de Zn) em feijoeiro-comum 'BRS Esteio' (A) e 'IPR Campos Gerais' (B), em função da aplicação foliar e via solo de Zn, na safra de verão 2017/2018.
Médias seguidas da mesma letra, minúscula comparando os tratamentos de Zn via foliar dentro de cada tratamento de Zn via solo, e maiúscula comparando os tratamentos de Zn via solo dentro de cada tratamento de Zn via foliar, não diferem entre si (Scott-Knott, $p < 0,05$).

As repostas em teor foliar de Zn em função dos tratamentos foram parecidas em ambos os experimentos. A aplicação de 600 g ha^{-1} de Zn via foliar durante o estádio de florescimento aumentou o teor foliar de Zn na magnitude de 180,5 % e 209,9 % nas cultivares BRS Esteio (Figura 13A) e IPR Campos Gerais (Figura 13B), respectivamente. Elevação no teor foliar de Zn em plantas de feijoeiro-comum após o fornecimento deste micronutriente via foliar também foi encontrado por outros autores (OLIVEIRA JUNIOR et al., 1995; TEIXEIRA et al., 2003; 2008).

Quando os teores de Zn estão muito elevados nos tecidos pode-se resultar em toxicidade às plantas, por afetar negativamente o processo da fotossíntese em função da redução da atividade dos cloroplastos e diminuição da síntese de ATP (MOUSAVI, 2011; MOUSAVI; GALAVI; REZAEI, 2013). Ressalta-se que o aumento de teor de Zn nas folhas das plantas durante o estádio de florescimento resultou em efeito tóxico para a cultivar BRS Esteio, reduzindo a produtividade de grãos (Figura 11A). Por outro lado, para a cultivar IPR Campos Gerais foi observado um pequeno aumento de produtividade de grãos (Figura 11 B) com o aumento do teor foliar de Zn, mostrando que durante o florescimento (estádio fenológico R6), há variação genotípica quanto ao teor foliar adequado de Zn na cultura do feijoeiro-comum.

O teor foliar de Zn tido como adequado para a cultura do feijoeiro no Estado do Paraná varia entre 26 a 60 mg kg^{-1} (SBCS, 2017). Neste estudo, sem a pulverização de Zn

via foliar, a média de teores foliares de Zn foi um pouco menor que o limite inferior de suficiência (20,5 e 19,1 mg kg^{-1} para as cultivares BRS Esteio e IPR Campos Gerais, respectivamente), mesmo o solo tendo alto teor de Zn disponível em condições naturais (9,86 mg dm^{-3}, Tabela 3). No entanto, com a pulverização foliar de Zn no estádio de florescimento, a média de teores foliares foi próxima ao limite superior de suficiência (57,2 e 59,2 mg kg^{-1} para as cultivares BRS Esteio e IPR Campos Gerais, respectivamente). Corroborando com o presente trabalho, Teixeira et al. (2008) também observaram que a aplicação foliar de Zn na dose de 800 g ha^{-1}, independente das fontes usadas no trabalho, elevou para 58 mg kg^{-1} os teores foliares de Zn em feijoeiro-comum.

A aplicação de 4 kg ha^{-1} de Zn no sulco de semeadura teve pouco efeito nos teores foliares de Zn das plantas, sendo significativo apenas no tratamento sem Zn foliar para a cultivar IPR Campos Gerais. O baixo efeito da aplicação de Zn no solo sobre a produtividade de grãos e teor foliar de Zn nas cultivares de feijoeiro-comum, mesmo o micronutriente sendo fornecido no sulco de semeadura, pode ser devido à característica do solo da área experimental, que é composto por um Latossolo Bruno de textura muito argilosa e com elevado teor de matéria orgânica, manejado em sistema de plantio direto. Em adição, a adubação fosfatada realizada no sulco de semeadura (cerca de 108 kg ha^{-1} de P_2O_5) pode exercer efeitos negativos sobre a absorção, translocação e aproveitamento do Zn pelas plantas (ALONSO et al., 2006; ZHAO; SELIM, 2010; BEHERA et al., 2011; HAFEEZ; KHANIF; SALEEM, 2013). Além disso, a estrutura radicular de uma espécie e, ou, genótipo influencia diretamente na capacidade de absorção de Zn pela planta e, ainda, o feijoeiro-comum é uma espécie que apresenta baixa eficiência no uso do Zn (MOREIRA; MORAES; REIS, 2018). Em trabalho com a cultura da soja, Oliveira et al. (2017) avaliaram diferentes doses (0, 3, 6, 9, e 12 kg ha^{-1}) de sulfato de Zn aplicadas via solo, em diferentes épocas (estádios fenológicos V9 e R1), e encontraram efeitos positivos na inserção de primeira vagem, teor foliar de Zn e produtividade de grãos.

A Tabela 3 mostra que o teor de Zn disponível no solo (9,86 mg dm^{-3}) da área experimental antes da implantação do experimento é considerado como alto pelo Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná (SBCS, 2017), que é comum nos solos da região Centro-Sul do terceiro planalto do Estado do Paraná que apresentam predominantemente a rocha basáltica como material de origem e, geralmente, tem bons teores de matéria orgânica em condições naturais. Por outro lado, alguns estudos têm mostrado que o extrator Mehlich-1 (metodologia oficialmente adotada pelos laboratórios

de solo do Estado do Paraná para análise de Zn) não tem apresentado boa eficiência para estimar o Zn-disponível em solos argilosos, ricos em matéria orgânica, e manejado em sistema de plantio direto (FONSECA; CAIRES; BARTH, 2010).

A exportação de Zn da área com a colheita de grãos foi significativa apenas para o fator Zn via foliar para a cultivar IPR Campos Gerais ($p < 0,05$) (Figura 14).

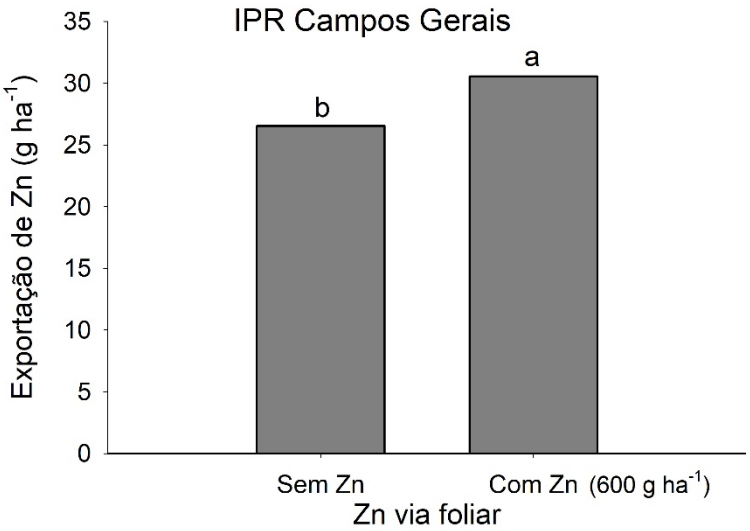

Figura 14. Estimativa de exportação de Zn da área com a colheita de grãos em feijoeiro-comum 'IPR Campos Gerais', em função da aplicação foliar de Zn, na safra de verão 2017/2018.
Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si (Scott-Knott, $p < 0,05$).

A pulverização foliar de Zn no florescimento para a cultivar IPR Campos Gerais elevou a produtividade de grãos (Figura 11B), o teor foliar de Zn (Figura 13B) e, consequentemente, o teor de Zn nos grãos, aumentando a exportação de Zn da área de 26,5 para 30,6 g ha^{-1} (Figura 14), um aumento de 15,5 %. Barbosa Filho e Silva (2000) relataram exportação média de 25 g ha^{-1} de Zn em uma área de cultivo de feijoeiro-comum com produtividade média de 2500 kg ha^{-1} de grãos, apresentando valores próximos dos encontrados neste estudo. Por outro lado, em trabalho utilizando duas cultivares de feijoeiro-comum e diferentes doses de adubação de NPK em semeadura, a quantidade de Zn exportada da área com os grãos colhidos foram bem maiores, variando de 40 a 96 g ha^{-1} (FERNANDES; SORATTO; SANTOS, 2013).

No experimento com a cultivar BRS Esteio não houve efeito significativo dos tratamentos sobre a exportação de Zn, pois, embora a pulverização foliar de Zn tenha elevado o teor de Zn nas folhas (Figura 13A), houve decréscimo de produtividade nesta

cultivar (Figura 11A), que foi determinante para que não resultasse em alteração significativa na exportação de Zn da área experimental com os grãos colhidos.

5.5.3. Teores foliares e exportação de macro e micronutrientes

A Tabela 4 apresenta o efeito dos tratamentos estudados sobre os teores foliares de nutriente nas plantas durante o florescimento pleno (estádio fenológico R6), em ambos os experimentos (exceto para o teor foliar de Zn, que já foi abordado no item anterior, Figura 13).

Verificou-se que as plantas de feijoeiro não apresentaram sintomas visuais de deficiência em nenhum nutriente. Baseando-se na faixa de suficiência de teores de macronutrientes (em g kg^{-1}: N = 30-40; P = 3,5-8; K = 28-35; Ca = 15-30; Mg = 3-6; S = 2,0-5,0) e micronutrientes (em mg kg^{-1}: Mn = 50-120; Cu = 8-20; e Fe = 250-500) tida como adequada para a cultura do feijoeiro (SBCS, 2017), em geral, os teores foliares encontrados para o N, K e S estão acima da faixa de suficiência, para o P, Ca, Mn e Cu estão dentro da faixa de suficiência, e o Mg e Fe estão abaixo na faixa de suficiência.

O teor foliar de N da cultivar IPR Campos Gerais foi influenciado pela interação dos fatores Zn via solo × Zn via foliar. Sem a pulverização foliar de Zn, o teor foliar de N foi reduzido em 11 % com a aplicação de Zn no solo; porém, esse efeito não foi evidenciado com a pulverização foliar de Zn. A interação entre Zn e N em plantas de feijoeiro foram evidenciados em outros trabalhos. Perez et al. (2013), trabalhando com adubação nitrogenada do feijoeiro em diferentes épocas, verificaram que a adubação de N em pré semeadura diminuiu os teores de Zn nos grãos em plantas de feijoeiro-comum. Quanto ao teor foliar de Ca, o fornecimento de Zn no solo aumentou o valor desta variável em 12,4 % na cultivar BR Esteio.

Com a aplicação de 4 kg ha^{-1} de Zn no sulco de semeadura, o teor foliar de S foi reduzido em 35,1 % na cultivar BRS Esteio e aumentado em 107,3 % na cultivar IPR Campos Gerais, mostrando efeito divergente entre as cultivares de feijoeiro-comum estudada. Kaya, Küçükyumuk e Erdal (2009) verificaram que o fornecimento de doses de S-elementar no solo (controle, 40, 80 e 120 kg ha^{-1}) elevou o teor de Zn em tecidos de plantas de feijoeiro-comum e milho.

O teor foliar de Mn na cultivar BRS Esteio foi aumentado em 40,6 % com a aplicação foliar de Zn. Fageria (2002) observaram que a aplicação de diferentes doses de

Mn no solo na cultura do feijoeiro-comum proporcionou aumento na absorção de Zn, Mn e K, porém, quando ocorreu a aplicação de diferentes doses de Zn, não houve aumento na absorção de Mn, somente de N, Mg e Cu.

Tabela 4. Teores foliares de nutrientes (3as folhas com pecíolo a partir do terço médio da planta) em feijoeiro-comum 'BRS Esteio' e 'IPR Campos Gerais', em função da aplicação foliar e via solo de Zn, na safra de verão 2017/2018.

		Cultivar BRS Esteio			**Cultivar IPR Campos Gerais**		
	Solo	**Foliar**			**Foliar**		
Macronutriente		**Sem Zn**	**Com Zn**	Média	**Sem Zn**	**Com Zn**	Média
		----------**g kg^{-1}**----------			----------**g kg^{-1}**----------		
	Sem Zn	81,3	75,1	78,2	90,0 aA	86,3 aA	88,2 a
N	Com Zn	84,2	83,2	83,7	79,4 bB	84,4 aA	81,9 b
	Média	82,8	79,2		84,7	85,4	
		(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)** / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)**		
	Sem Zn	5,75	5,25	5,50	5,44	5,28	5,36
P	Com Zn	5,28	5,04	5,16	5,98	5,61	5,79
	Média	5,52	5,15		5,71	5,44	
		(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
	Sem Zn	40,9	41,7	41,3	35,5	36,0	35,7
K	Com Zn	39,0	44,4	41,7	35,2	35,3	35,3
	Média	40,0	43,0		35,3	35,6	
		(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
	Sem Zn	29,4	28,8	29,1 a	23,8	27,2	25,5
Ca	Com Zn	25,1	26,6	25,9 b	26,9	27,9	27,4
	Média	27,2	27,7		25,3	27,5	
		(Solo)* / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
	Sem Zn	2,56	2,49	2,53	2,59	2,64	2,61
Mg	Com Zn	2,60	2,60	2,60	2,56	2,57	2,56
	Média	2,58	2,54		2,58	2,60	
		(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
	Sem Zn	15,8	15,0	15,4 a	6,3	7,3	6,8 b
S	Com Zn	9,2	10,8	10,0 b	15,0	13,2	14,1 a
	Média	12,5	12,9		10,6	10,2	
		(Solo)** / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)** / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
Micronutriente							
		----------**mg kg^{-1}**----------			----------**mg kg^{-1}**----------		
	Sem Zn	56,6	67,7	62,2	50,1	46,6	48,3
Mn	Com Zn	47,4	78,5	63,0	49,3	37,2	43,3
	Média	52,0 B	73,1 A		49,7	41,9	
		(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)* / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
	Sem Zn	12,3	11,8	12,0	12,3	12,0	12,1
Cu	Com Zn	12,7	12,1	12,4	11,7	11,1	11,4
	Média	12,5	11,9		12,0	11,5	
		(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
	Sem Zn	139,8	114,3	127,0	137,0	143,1	140,01
Fe	Com Zn	126,0	124,3	125,2	133,6	136,1	134,9
	Média	132,9	119,3		135,3	139,61	
		(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		

**, * e ^{ns} = $p < 0,01$, $p < 0,05$ e $p > 0,05$, respectivamente, pelo teste de F. Médias seguidas da mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si (Scott-Knott, $p < 0,05$).

Os dois fatores estudados neste trabalho (Zn via solo e Zn via foliar) tiveram pouco efeito sobre os teores dos demais nutrientes nas folhas das cultivares de feijoeiro-comum estudadas, em estádio de florescimento. Dessa forma, os teores foliares de P, K, Mg, Cu e Fe de ambas as cultivares não foram significativamente influenciados pelos tratamentos. Por outro lado, Teixeira et al. (2003) observaram que a pulverização foliar de Zn e Mn nas doses de 280 e 315 g ha^{-1}, respectivamente, proporcionaram o aumento dos teores foliares de N, K, Ca, Mg, S, B, Cu e Fe em plantas de feijoeiro-comum.

A Tabela 5 apresenta a exportação de nutrientes da área experimental com a colheita dos grãos de feijão para ambas as cultivares em função dos tratamentos (exceto para a exportação de Zn, que já foi abordado no item anterior, Figura 14).

O efeito dos tratamentos de Zn sobre a exportação de nutrientes da área foi diferenciado entre os experimentos. Para o experimento com a cultivar BRS Esteio não houve efeito significativo dos tratamentos sobre a exportação dos nutrientes N, Ca, Mg, S, Fe e Cu. Nessa cultivar, a exportação de P, K e Mn foi aumentada em 14,3 %, 46,3 % e 51,1 % com a aplicação de 4 kg ha^{-1} de Zn no sulco de semeadura, respectivamente.

Para o experimento com a cultivar IPR Campos Gerais, a pulverização foliar de Zn resultou em aumentos da ordem de 19,6 %, 30,9 %, 17,0 %, 35,7 %, 28,2 %, 24,5 % e 20,2 % na exportação dos nutrientes P, Ca, Mg, S, Mn, Cu e Fe, respectivamente. Esse considerável aumento na exportação de nutrientes da área foi devido ao efeito da pulverização foliar de Zn sobre a produtividade de grãos dessa cultivar (Figura 11B), sendo que a estimativa da exportação de nutrientes foi calculada pela relação entre a produtividade com o teor de nutrientes dos grãos. A aplicação de Zn no solo para a cultivar Campos Gerais afetou apenas a exportação de K, elevando o valor em 19,4 %.

O conhecimento sobre a quantidade de nutrientes que é exportado da área com a colheita dos produtos agrícolas tem sido de grande relevância para o programa de adubação de solos com fertilidade construída, visando apenas a manutenção ou restituição dos nutrientes extraídos. Considerando os tratamentos que não receberam fertilização de Zn, neste trabalho, as exportações médias de nutrientes da área com os grãos colhidos de ambas as cultivares obedeceram à ordem para os macronutrientes N > K > P > Ca ≈ S > Mg e à ordem para os micronutrientes Fe > Mn > Cu > Zn.

Tabela 5. Estimativa de exportação de nutrientes da área com a colheita de grãos em feijoeiro-comum 'BRS Esteio' e 'IPR Campos Gerais', em função da aplicação foliar e via solo de Zn, na safra de verão 2017/2018.

		Cultivar BRS Esteio			Cultivar IPR Campos Gerais		
	Solo	Foliar			Foliar		
Macronutriente		**Sem Zn**	**Com Zn**	Média	**Sem Zn**	**Com Zn**	Média
		----------kg ha^{-1}----------			---------- kg ha^{-1}----------		
N	Sem Zn	167,5	121,2	144,3	148,8	167,0	157,9
	Com Zn	154,9	173,9	164,4	172,4	160,5	166,4
	Média	161,2	147,5		160,6	163,7	
		(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
P	Sem Zn	10,2	6,6	8,4 b	9,3	12,3	10,8
	Com Zn	9,5	9,7	9,6 a	10,1	11,0	10,5
	Média	9,9	8,2		9,7 B	11,6 A	
		(Solo)* / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)** / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
K	Sem Zn	48,6	32,2	40,4 b	46,7	55,0	50,9 b
	Com Zn	58,1	60,2	59,1 a	59,9	61,8	60,8 a
	Média	53,3	46,2		53,3	58,4	
		(Solo)** / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)* / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
Ca	Sem Zn	7,7	6,5	7,1	7,4	9,2	8,3
	Com Zn	7,7	7,2	7,5	6,2	8,6	7,4
	Média	7,7	6,9		6,8 B	8,9 A	
		(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)** / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
Mg	Sem Zn	5,4	3,5	4,4	5,2	6,3	5,7
	Com Zn	5,3	5,4	5,4	5,5	6,1	5,8
	Média	5,3	4,5		5,3 B	6,2 A	
		(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)* / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
S	Sem Zn	6,8	4,7	5,7	8,2	12,0	10,1
	Com Zn	5,3	6,5	5,9	8,5	10,8	9,7
	Média	6,0	5,6		8,4 B	11,4 A	
		(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)*** / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
Micronutriente							
		----------g ha^{-1}----------			---------- g ha^{-1}----------		
Mn	Sem Zn	60,2	81,0	70,6 b	79,2	108,2	93,7
	Com Zn	101,9	111,5	106,7 a	92,5	111,8	102,1
	Média	81,1	96,3		85,8 B	110,0 A	
		(Solo)*** / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)** / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
Cu	Sem Zn	44,9	34,8	39,8	34,5	46,6	40,5
	Com Zn	40,0	38,6	39,3	36,5	41,7	39,1
	Média	42,5	36,7		35,5 B	44,2 A	
		(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)* / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		
Fe	Sem Zn	252,4	252,4	252,4	181,2	229,0	205,1
	Com Zn	235,3	235,3	235,3	193,2	221,0	207,1
	Média	243,9	243,9	243,9	187,2 B	225,0 A	
		(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$			(Solo)$^{n.s.}$ / (Foliar)$^{n.s.}$ / (Solo×Foliar)$^{n.s.}$		

**, * e ^{ns} = $p < 0,01$, $p < 0,05$ e $p > 0,05$, respectivamente, pelo teste de F. Médias seguidas da mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si (Scott-Knott, $p < 0,05$).

5.6. Conclusões

As aplicações de Zn via solo e, ou, foliar elevaram a altura de inserção de primeira vagem da cultivar BRS Esteio, mas não houve efeito na cultivar IPR Campos Gerais.

A pulverização foliar de Zn no estádio fenológico de florescimento elevou em, aproximadamente, duas vezes o teor foliar de Zn em ambas as cultivares de feijoeiro-comum, porém, afetou negativamente a produtividade de grãos na cultivar BRS Esteio.

A aplicação de Zn no solo diminuiu os teores foliares de Ca e S da cultivar BRS Esteio, reduziu e aumentou os teores foliares de N e S da cultivar IPR Campos Gerais, respectivamente, enquanto que a aplicação foliar de Zn elevou o teor foliar de Mn da cultivar BRS Esteio.

Sem a aplicação dos tratamentos de Zn, as exportações médias de nutrientes da área com os grãos colhidos de ambas as cultivares obedeceram à ordem para os macronutrientes N > K > P > Ca ≈ S > Mg e à ordem para os micronutrientes Fe > Mn > Cu > Zn.

A aplicação de Zn no solo resultou em maior exportação de P, K e Mn para a cultivar BRS Esteio e, também, a exportação de K para a cultivar IPR Campos gerais, enquanto que a pulverização foliar de Zn aumentou consideravelmente a exportação de Zn, P, Ca, Mg, S, Mn, Fe e Cu para a cultivar IPR Campos Gerais.

5.7. Referências Bibliográficas

ALONSO, F. P. et al. Agronomic implications of the supply of lime and gypsium by-products to palexerults from western spain. **Soil Science**, v. 171, n. 1, p. 65-81, 2006.

BARBOSA FILHO, M. P.; SILVA, O. F. Adubação e calagem para o feijoeiro irrigado em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1317-1324, 2000.

BEHERA, S. K. et al. Distribuition variability of total and extractable zinc in cultivated acid soils of India and their relationship with some selected soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 162, n. 3, p. 242-250, Maio, 2011.

BLAIR, M. et al. Genetic diversity, inter-gene pool introgression and nutritional quality of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) from central africa. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 121, p. 237–248, 2010.

BLAIR, M. W. Mineral biofortification strategies for food staples: the example of common bean. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 61, n. 35, p. 8287-8294, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa nº 12, de 28 de março de 2008. Regulamento técnico do feijão. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 31 mar. 2008. Seção 1.

BROUGHTON, W. J. et al. Beans (*Phaseolus* spp.)-model food legumes. **Plant Soil**, v. 252, p. 55–128, 2003.

CANTARELLA, H.; PROCHNOW, L. I. Determinação de sulfato em solos. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A., eds. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, p. 225-230, 2001.

DEL PELOSO, M. J.; MELO, L. C. **Potencial de rendimento da cultura do feijoeiro-comum**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005. 131 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, Embrapa informação tecnológica, 2009. 627p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Soluções tecnológicas – Feijão BRS Esteio**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/2044/feijao---brs-esteio>. Acesso em 20 abr. 2019.

FAGERIA, N. K. Influence of micronutrients on dry matter yield and interaction with other nutrients in annual crops, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1765–1772, dez. 2002.

FERNANDES, A. M.; SORATTO, R. P.; SANTOS, L. A. Nutrient extraction and exportation by common bean cultivars under different fertilization levels: II - micronutrients, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1043–1056, ago. 2013.

FERNÁNDEZ DE CÓRDOVA, F.; GEPTS, P. L.; LÓPEZ GENES, M. **Etapas de desarrollo de la planta de frijol comúm (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 1986. 34 p.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

FONSECA, A. F.; CAIRES, E. F.; BARTH, G. Extraction methods and availability of micronutrients for wheat under a no-till system with a surface application of lime. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 1, p. 60-70, 2010.

HAFEEZ, B.; KHANIF, Y. M.; SALEEM, M. Role of Zinc in Plant Nutrition- A Review, **American Journal of Experimental Agriculture**, v. 3, n. 2, p. 374–391, jan. 2013.

HAN, X. et al. Zinc fractions and availability to soybeans in represent soils of Northeast China. **Journal Soils & Sediements**, v. 11, p. 596-606, 2011.

IAPAR – INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Principais características das cultivares de feijão com sementes disponíveis no mercado**. Disponível em: http://www.iapar.br/pagina-1363.html>. Acesso em 20 abr. 2019.

KAYA, M.; KÜÇÜKYUMUK, Z.; ERDAL, I. Effects of elemental sulfur and sulfur-containing waste on nutrient concentrations and growth of bean and corn plants grown on a calcareous soil, **African Journal of Biotechnology**, v. 8, n. 18, p. 4481-4489, 2009.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. **Academic Press**, 3ª Ed. London, 2012. 651p.

MICHALOVICZ, L. **Atributos químicos do solo e resposta da sucessão milho-cevada-feijãotrigo influenciados por doses e parcelamento de gesso em plantio direto**. 2012. 54 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2012.

MOREIRA, A.; MORAES, L. A. C.; DOS REIS, A. R. The Molecular Genetics of Zinc Uptake and Utilization Efficiency in Crop Plants. In: HOSSAIN, M. A.; KAMIYA, T.; BURRITT, D. J.; TRAN, L. S. P. FUJIWARA, T. **Plant Micronutrient Use Efficiency**. Elsevier, 2018. The Molecular Genetics of Zinc Uptake and Utilization Efficiency in Crop Plants, p. 87–108.

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.

MOUSAVI, S. R.; GALAVI, M.; REZAEI, M. Zinc (Zn) Importance for Crop Production – A Review, **International Journal of Agronomy and Plant Production**, v. 4, n. 1, p. 64-68, 2013.

OLIVEIRA JUNIOR, J. A. et al. E. Efeito de fontes e de aditivos na absorção de ^{35}S via foliar pelo feijoeiro. Scientia Agricola, Piracicaba, v. 52, n. 3, p. 452-457, set./ dez. 1995.

OLIVEIRA, F. C. et al. do Diferentes doses e épocas de aplicação de zinco na cultura da soja. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 5, p. 28-35, 2017.

OLIVEIRA N. T. et al. Effects on food-type soybean cultivars when biofortified with different rates of zinc, **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, nº 3, p. 647–654, jul. 2018.

PAVAN, M. A. et al. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. Londrina: IAPAR, 1992. 40 p. (IAPAR. Circular 76).

PEREIRA, H. S. et al. Environmental influence in common bean cultivars grown in Brazilian savannah with low altitude. **Bragantia**, v. 71, n. 2, p. 165-172, 2012.

PEREZ, A. A. G. et al. Extração e exportação de nutrientes pelo feijoeiro adubado com nitrogênio, em diferentes tempos de implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1276–1287, out. 2013.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.r-project.org/, 2016.

RAM, H. et al. Biofortification of wheat, rice and common bean by applying foliar zinc fertilizer along with pesticides in seven countries. **Plant and soil**, v. 403, n. 1-2, p. 389-401, 2016.

REHMAN, A. et al. Zinc nutrition in wheat-based cropping systems, **Plant and Soil**, vol. 422, n. 1–2, p. 283–315, jan. 2018.

SADEGHZADEH, B. A review of zinc nutrition and plant breeding. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition.** vol. 13, p. 905-927, 2013.

SBCS – SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO / NÚCLEO ESTADUAL PARANÁ. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017. 482 p.

SILVA, C. A.; ABREU, A. de F. B.; RAMALHO, M. A. P. Associação entre arquitetura de planta e produtividade de grãos em progênies de feijoeiro de porte ereto e prostrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 12, p. 1647-1652, dez. 2009.

TEIXEIRA, I. R. et al. Fontes e doses de zinco no feijoeiro cultivado em diferentes épocas de semeadura, **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 30, n. 2, abr. 2008.

TEIXEIRA, I. R. et al. Nutrição mineral do feijoeiro em função de doses de manganês e zinco. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 24, n. 2, p. 235-242, jul./dez. 2003.

VIEIRA, R. C. B. et al. Potassium fertilization for long term no-till crop rotation in the Central-Southern region of Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, e0150193, 2016.

WELCH, R. M. et al. Genetic selection for enhanced bioavailable levels of iron in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 48, p. 3576–3580, 2000.

ZHAO, K.; SELIM, H. M. Adsorption-desorption kinetics of Zn in soils: influence of phosphate. **Soil Science**, Baltimore, v. 175, n. 4, p. 145-153, Abr. 2010.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cultivo de feijoeiro-comum é extenso no Brasil, sendo a leguminosa a pronto consumo mais produzida no país. O grão de feijão se destaca pelo seu valor nutritivo, principalmente em nutrientes como Fe e Zn, além de ser rico em proteínas, que aliada a alta produção, a torna de extrema importância em estudos relacionados à biofortificação, na busca de reduzir as deficiências nutricionais em humanos.

O Paraná destaca-se como o maior produtor de feijão no Brasil. A cultivar BRS Esteio (grupo preto) está entre as mais cultivadas no Estado, apresentando características de boa produção e resistência/tolerância à fatores bióticos e abióticos. Por outro lado, a cultivar IPR Campos Gerais (grupo carioca) está entre as mais cultivadas no segundo planalto paranaense, região que se destaca na produção de feijão no Estado do Paraná.

Com o intuito de realizar trabalhos de biofortificação com Zn em cultivares de feijoeiro-comum amplamente cultivadas no Estado do Paraná resultou na escolha das cultivares supracitadas. Com a fertilização de Zn no solo e, ou, foliar durante o cultivo das cultivares de feijoeiro-comum houve melhorias na qualidade nutritiva do produto final (grãos), que apresentaram maiores teores de Zn e, de forma geral, elevação nos teores de proteínas de reserva, aminoácidos, açúcares totais e sacarose. Porém, essa melhora na qualidade foi distinta entre os diferentes tratamentos de fornecimento de Zn e entre as cultivares testadas, demonstrando que existe diferença genotípica quanto a absorção, translocação e eficiência de utilização do Zn pela planta.

Assim, estudos de biofortificação de Zn com a cultura do feijoeiro-comum devem ser explorados de forma a abordar diferentes cultivares de diferentes regiões e condições edafoclimáticas, associado com o uso de diferentes formas e épocas de aplicação, verificando a interação do Zn com outros nutrientes no solo e na planta, e os fatores antinutricionais presentes nos grãos de feijão que reduzem a biodisponibilidade do Zn no organismo humano, entre outros.

As informações obtidas com o presente trabalho, aliadas com os resultados de outros estudos, podem ser de grande valia para áreas relacionadas com a nutrição de plantas e biofortificação agronômica, podendo auxiliar desde a melhoria de produtividade, como também da qualidade nutricional dos grãos de feijão para a alimentação humana.