



SUELLEN NUNES DE ARAÚJO

**ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO DE SELÊNIO PARA
BIOFORTIFICAÇÃO DO FEIJOEIRO COMUM E SEUS
EFEITOS RESIDUAIS NO CAPIM MOMBAÇA**

**LAVRAS-MG
2020**

SUELLEN NUNES DE ARAÚJO

**ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO DE SELÊNIO PARA
BIOFORTIFICAÇÃO DO FEIJOEIRO COMUM E SEUS
EFEITOS RESIDUAIS NO CAPIM MOMBAÇA**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Lavras, como
parte das exigências do Programa de
Pós Graduação em Ciência do Solo,
área de concentração em Fertilidade do
Solo e Nutrição de plantas, para
obtenção do título de mestre.

Prof. Dr. Guilherme Lopes
Orientador

**LAVRAS-MG
2020**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Araújo, Suellen Nunes de.

Estratégias de aplicação de selênio para biofortificação do feijoeiro comum e seus efeitos residuais no capim Mombaça / Suellen Nunes de Araújo. - 2019.

45 p. : il.

Orientador(a): Guilherme Lopes.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Biofortificação. 2. Selênio. 3. Estratégias de Aplicação e Efeito Residual. I. Lopes, Guilherme. II. Título.

SUELLEN NUNES DE ARAÚJO

**ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO DE SELÊNIO PARA BIOFORTIFICAÇÃO DO
FEIJOEIRO COMUM E SEUS EFEITOS RESIDUAIS NO CAPIM MOMBAÇA**

**SELENIUM ADDITION STRATEGIES FOR BIOFORTIFICATION OF COMMON
BEAN AND THEIR RESIDUAL EFFECTS ON MOMBAÇA GRASS.**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Lavras, como
parte das exigências do Programa de
Pós Graduação em Ciência do Solo,
área de concentração em Fertilidade do
Solo e Nutrição de plantas, para
obtenção do título de mestre.

APROVADA em 14 de março de 2019.
Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme
Dr. Sílvio Júnio Ramos

UFLA
ITV-VALE

Prof. Dr. Guilherme Lopes
Orientador

**LAVRAS-MG
2020**

A Deus.

Ao meu pai Cláudio Rodrigues de Araújo.

A minha mãe Maria Inez Nunes de Araújo.

Aos meus irmãos Kellen, Karina, Allina e Cláudio Filho.

Aos meus familiares.

Aos meu amigos.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre esteve comigo me dando suporte e forças pra prosseguir.

Aos meus pais e família por toda confiança, esperança, dedicação e apoio.

As amigas e irmãs da graduação, Flaviane, Rayza, Shyrlene, que me escutaram quando precisei, e me apoiaram nos momentos difíceis e por serem minha família na distância de casa.

Aos amigos das modalidades esportivas, por serem minha válvula de escape da pressão do mestrado, sem o esporte seria tudo bem mais difícil, e por me proporcionarem momentos como atleta jamais esquecidos.

Ao Josimar pela ajuda e amizade.

Aos colegas Jéssica, Rubi, Gustavo, Raul, Jéssica Francisco, Fábio, Matheus e Danilo pela colaboração.

Universidade Federal de Lavras (UFLA), e ao corpo docente pelo conhecimento transmitido.

A Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio a pesquisa realizada.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio a pesquisa realizada.

Ao professor pesquisador e meu orientador Guilherme Lopes pela oportunidade de aprendizado, confiança e conhecimento a mim transmitido, principalmente por demonstrar como se tornar um excelente profissional e por ensinar a vontade de sempre querer buscar o conhecimento.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo consentimento da bolsa, me permitindo desenvolver meu trabalho e estudos durante período de mestrado.

MUITO OBRIGADA!

*“Os únicos limites das nossas realizações de amanhã são as nossas dúvidas e hesitações de hoje”
(Franklin Roosevelt)*

RESUMO

Em uma abordagem que venha propiciar melhorias na nutrição e na saúde humana, a biofortificação de alimentos emergiu como uma estratégia eficaz para aumentar os conteúdos de Se nos alimentos. Este trabalho objetivou avaliar diferentes estratégias de aplicação de Se para a biofortificação agrônômica do feijoeiro comum e o efeito residual dessas aplicações no enriquecimento do capim mombaça com Se. Para esse estudo, foi coletada a camada de 0-20 cm de um Latossolo Vermelho-amarelo distrófico de textura argilosa. Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação localizada na Universidade Federal de Lavras. Visando avaliar a biofortificação do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.), montou-se um experimento em blocos casualizados, em arranjo fatorial 5x6, sendo 5 doses de Se (0,0; 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8 mg dm⁻³) e 6 métodos de aplicação. A fonte de Se utilizada em todos os métodos de aplicação foi o selenato de sódio. Os métodos testados para adição de Se foram: MAP enriquecido com Se (MAP-Se), Ureia enriquecida com Se (Ureia-Se), pulverização foliar (Foliar-Se), MAP-Se + Ureia-Se, MAP-Se + Foliar-Se e Ureia-Se + Foliar-Se. Visando avaliar o efeito residual dos diferentes métodos de adição de Se, foi cultivado nos mesmos vasos, posteriormente ao feijoeiro, o capim-mombaça (*Panicum maximum* Jacq. vr. Mombaça). O fornecimento de Se possibilitou o aumento dos teores de Se dos grãos de feijão e da parte aérea do capim mombaça, havendo variações nesta eficiência entre os métodos de aplicação avaliados e sendo que os métodos Ureia-Se, Foliar-Se e Ureia-Se + Foliar-Se foram os mais eficientes. Nos grãos de feijão, o fornecimento de doses crescentes de Se às plantas propiciaram incrementos lineares positivos na concentração de Se para todos os métodos avaliados. Os métodos que receberam a aplicação de Se via solo apresentam grande potencial de efeito residual, principalmente para os métodos MAP-Se, Ureia-Se e MAP-Se + Ureia-Se, uma vez que foi verificado incremento nos teores de Se na parte aérea da forrageira cultivada em sucessão ao feijoeiro. Evidencia-se que a aplicação de Se, na forma de selenato de sódio via fertilizantes disponibilizados no solo e via foliar, viabiliza o aumento do conteúdo de Se no grão de feijão sendo uma estratégia viável no processo de biofortificação com selênio.

Palavras chave: Selênio. MAP. Ureia. Pulverização. Efeito Residual.

ABSTRACT

In an approach that offers specific improvements in human nutrition and health, food biofortification has emerged as an effective strategy to increase the content of Se in food. This work aims to evaluate different Se application strategies for agronomic biofortification of common bean and the residual effect of these applications without improving mombaça grass with Se. For this study, a 0-20 cm layer of a dystrophic Red-yellow Latosol with a clay texture was collected. The experiments were conducted in a greenhouse located at the Federal University of Lavras. In order to evaluate a biofortification of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.), set up an experiment in randomized blocks, in a 5x6 factorial arrangement, with 5 doses of Se (0.0; 0.2; 0.4; 0.6 and 0, 8 mg dm⁻³) and 6 methods of application. A source of Se used in all application methods was selected for sodium. The tested methods for adding Se were: MAP enriched with Se (MAP-Se), urea enriched with Se (Urea-Se), foliar spray (Foliar-Se), MAP-Se + Urea-Se, MAP-Se + Folia -Se and Urea-Se + Foliar-Se. In order to evaluate the residual effect of the different Se addition methods, it was grown in the same pots, after the bean, or mombaça grass (*Panicum maximum* Jacq vr. Mombaça). The supply of Se makes it possible to increase bean grains and the aerial part of mombaça grass, with a reduction in these measures between the application methods that are used and those that are the Urea-Se, Foliar-Se and Urea-Se + Foliar-Se were the most efficient. In bean grains, or the supply of increasing doses of plants to plants provided positive linear increases in plant concentration for all methods used. The methods that received an application via soil presenting a great potential for residual effect, mainly for the MAP-Se, Urea-Se and MAP-Se + Urea-Se methods, since increments in the contents of Se in the aerial part of the forage were selected grown in succession to beans. It shows whether an application of Se, in the form of sodium selector via fertilizers available in the soil and via foliar, enables or increases the content of Se in the bean bean, being a viable strategy in the biofortification process with selenium.

Keywords: Selenium. MAP. Urea. Foliar spray. Residual effect.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1. Ocorrência geoquímica do selênio	12
2.2. Selênio no solo	13
2.3. Selênio no sistema solo-planta.....	15
2.4. Biofortificação de alimentos com Se e sua essencialidade para humanos e animais	16
2.5. Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cv. BRS FC104 – Embrapa	18
2.6. Capim mombaça (<i>Panicum maximum</i>).....	20
3 MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1. Caracterização, coleta e preparo do solo	20
3.2. Localização e delineamento experimental	21
3.3. Enriquecimento dos fertilizantes com Se	22
3.4. Cultivo do feijoeiro	22
3.5. Cultivo do capim mombaça.....	23
3.6. Determinação do teor de Se	24
3.7. Análises estatísticas	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
4.1. Enriquecimento do feijoeiro com Se	24
4.2. Efeito residual do Se no solo sobre o capim mombaça	31
5 CONCLUSÕES.....	34
REFERÊNCIAS.....	34
ANEXOS.....	42

1 INTRODUÇÃO

O Se é elemento essencial para humanos e animais, sendo sua essencialidade relacionada com a sua participação na constituição estrutural de determinadas selenoproteínas e ARNt (PILON-SMITS et al., 2009). Sendo o Se constituinte importante de vinte e cinco selenoproteínas, o mesmo desempenha funções fundamentais em diversos processos fisiológicos, como no metabolismo de hormônios da tireoide, defesa antioxidante e sistema imunológico (RAYMAN, 2012).

A deficiência de Se na nutrição humana já se apresenta como uma questão importante à saúde há algumas décadas. Segundo D'amato et al. (2018) e Gao et al., (2018), a ingestão diária de Se está em uma faixa abaixo de 50 μg pessoa⁻¹. Esse quadro é recorrente em regiões do globo onde os solos, de maneira geral, contêm baixa quantidade de Se. Portanto, os alimentos produzidos nesses locais são pobres nesse elemento (NOTHSTEIN et al., 2016).

Cuidados em relação a ingestão de Se devem ser adotados, uma vez que, tanto a deficiência desse elemento, quanto o excesso, causam distúrbios no sistema fisiológico de animais e humanos (FAIRWEATHER-TAIT et al., 2011). O Se ingerido em excesso pode causar doenças como hipotireoidismo (HATFIELD et al., 2014; RAYMAN, 2012). Já, o Se ingerido em quantidades adequadas está associado a diversos benefícios, como redução da incidência de câncer, doenças cardiovasculares, degeneração, bem como doenças virais e retardamento do início da AIDS em pacientes HIV-positivos (HATFIELD et al., 2014).

Em uma abordagem que venha propiciar melhorias na nutrição e na saúde humana, a biofortificação de alimentos que consiste em um processo que visa aumentar os valores nutricionais das culturas de elementos essenciais a nutrição animal e humana, emergiu como uma estratégia eficaz e segura para aumentar os conteúdos de Se nos alimentos e assim também se aumenta a ingestão de alimentos enriquecidos com Se (BAÑUELOS et al., 2016; LOPES et al., 2017).

Dentre as estratégias de disponibilização de selênio para animais e humanos através de alimentos enriquecidos podemos descrever a biofortificação genética que aborda melhoramento de plantas para acúmulo de Se. Além disso, tem-se a biofortificação agrônômica que consiste no uso de fertilizantes contendo selênio disponibilizados as culturas via solo ou por pulverização foliar (LOPES et al., 2017).

Apesar de não ser considerado um elemento essencial às plantas, em determinadas quantidades, o Se pode apresentar efeito benéfico, aumentando o crescimento e o rendimento de algumas culturas, uma vez que, o mesmo atua no sistema antioxidante que protege a planta

contra estresses oxidativos gerados por radicais livres de oxigênio (PANDEY; GUPTA, 2015).

A planta acumula Se do solo por vários processos que dependem da espécie do Se. O selenato se apresenta como uma forma de Se relativamente móvel na solução do solo, sendo, portanto, mais absorvido pelas plantas (PILBEAM et al., 2015). Dessa maneira, a adição de selenato ao solo favorece o acúmulo mais eficiente de Se pelas plantas, sendo então mais eficiente que o selenito (FORDYCE, 2013; PILBEAM et al., 2015). Contudo, a absorção do selenato pelas plantas pode ser influenciada pelo manejo/cultivo do solo, visto que a adsorção de selenato depende de ânions concorrentes, como sulfato e fosfato, os quais estão em teores mais altos em solos cultivados do que em solos naturais. Nesse contexto, em solos não cultivados, a absorção de Se pelas plantas tende a ser menor quando comparada a de solos cultivados devido ao fato desses últimos apresentarem menores capacidades de adsorção visto a competição do Se com os ânions concorrentes, como S e P (LESSA et al., 2016).

Enfatiza-se que, no processo de biofortificação, onde se disponibiliza Se para as plantas, este pode passar de benéfico para tóxico, dependendo da quantidade suprida, da espécie do elemento e da espécie cultivada (DRAHONOVSKÝ et al., 2016). Sendo importante se determinar qual a dose mais adequada de Se para se fornecer as plantas assim como qual método via solo ou folha seria o mais eficiente para esse processo de biofortificação.

A base da ciclagem do Se em organismos vivos se fundamenta no seu comportamento biogeoquímico no sistema solo-planta. Portanto, o conteúdo de Se encontrado em alimentos vegetais está diretamente ligado ao teor de Se no solo. Assim, é de fundamental importância o monitoramento da transferência do Se do solo para a planta (FORDYCE et al., 2000).

O feijão é uma leguminosa que possui importante papel na segurança alimentar, estando presente na alimentação diária dos brasileiros, sendo então a principal fonte de proteínas e nutrientes depois da proteína animal, possuindo também um bom teor de fibras, minerais e vitaminas (SGARBIERI; WHITAKER, 1982; MAPA, 2018). O consumo brasileiro de feijão está em 17 kg pessoa⁻¹ano⁻¹ e sua ingestão contribui com 28% de proteína e 12% de calorias (SGARBIERI, 1980, MAPA, 2018). Portanto, essa espécie pode funcionar como veículo de Se para a população brasileira, sendo importante estudos que avaliem diferentes estratégias para a biofortificação de feijão com Se.

De maneira a se avaliar o efeito residual da aplicação de selênio via solo no processo de biofortificação o capim-mombaça se apresenta como uma espécie em potencial sendo uma das principais forrageiras produzidas em regiões de clima subtropical e tropical, possuindo

grande valor por apresentar elevada capacidade de produção de massa seca, qualidade de forragem, facilidade de estabelecimento e preferência pelos animais (TORRES et al., 2015). Logo, o mesmo apresenta um grande potencial para ser cultivado em áreas anteriormente cultivadas com cereais e que receberam Se visando avaliar sua capacidade em absorver o residual de Se que possa ainda estar no solo.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo identificar a melhor estratégia/método de disponibilização de Se (envolvendo a adição via solo e folha), a dose mais adequada para a biofortificação agrônômica do feijoeiro comum, nas condições do presente estudo, e o efeito residual das aplicações de Se no cultivo do capim.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Ocorrência geoquímica do selênio

O selênio (Se) é um elemento químico que foi descoberto em 1817 pelo químico sueco Jons Jacob Berzelius. Este elemento é classificado como um não metal, entretanto, apresenta propriedades comuns aos elementos químicos do grupo dos metais. O Se faz parte dos elementos que se enquadram no grupo VI na tabela periódica. Sua massa atômica é 78,96 g mol⁻¹ e número atômico 34. Segundo Neal (1995), esse elemento possui grande similaridade com o elemento enxofre, principalmente quanto as suas formas e compostos químicos.

De acordo com Puschenreiter (2009), o Se se combina com outras substâncias, como minerais de sulfeto, níquel, prata, cobre e chumbo, sendo que sua ocorrência no meio ambiente é mais frequentemente associada a minerais de sulfeto. O Se pode ser liberado em concentrações significativas no meio ambiente, seja no ar, solo e água por atividades naturais, e também, por ações antropogênicas (FORDYCE, 2013). As emissões de origem antropogênica correspondem de 50 a 65% na escala de emissões global (MOSHER; DUCE, 1987).

Dentre as fontes naturais que podem liberar Se no meio ambiente tem-se: incêndios florestais, erupções vulcânicas, processos de oxidação das superfícies dos solos, oceanos e mares, a erosão do solo, o crescimento das plantas e também processos magmáticos, onde sulfuretos de ferro, cobalto e níquel se desprendem, liberando Se no meio (CUVARDIC, 2003).

A liberação antropogênica do Se no meio ambiente pode ser oriunda da combustão de combustíveis como petróleo e carvão, lançando o elemento na atmosfera. Outra forma de

liberação do elemento no meio ambiente são os processos de extração de zinco, cobre, fosfato, urânio e chumbo (FERNANDEZ-MARTÍNEZ; CHARLET, 2009). Ressalta-se que, dentre os processos antropogênicos apresentados, a queima do carvão é a principal fonte de liberação do Se para o meio ambiente (BRANDT et al., 2017).

A produção global de Se, até o ano de 2010, estava abaixo de 1600 toneladas, porém, em 2011 houve um aumento drástico, ultrapassando 2000 toneladas métricas. Entre os anos de 2011 e 2016 houve uma constância na produção mundial, com valores variando entre 2200 e 2400 toneladas métricas, sendo que, as principais refinarias de Se se encontram na Bélgica, Japão, Canadá e Estados Unidos, de acordo com informações da agência de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos (*United States Geological Survey-USGS*) (USGS, 2017).

O setor de metalurgia é o responsável pelo consumo de 40% de todo o Se produzido no mundo, seguido da fabricação de vidros (25%), componentes eletrônicos (10%), pigmentos e produtos químicos (10%), agricultura (10%) e outras formas de uso menos significativas (5%) (USGS, 2017). Dentre os setores onde o Se é consumido, na agricultura o Se pode ser aplicado como fertilizante de plantas, além disso, o mesmo também é utilizado na dieta humana e na fabricação de rações de animais (EL-RAMADY et al., 2015).

2.2. Selênio no solo

O processo de erosão de rochas é a principal fonte natural de Se no solo e, o que determina a sua concentração nesse meio é a composição do material de origem (ROSENFELD; BEATH, 2013). Para Wang e Gao (2001), cerca de 40% do Se presente na crosta terrestre está contido nas rochas. Assim, a variação do conteúdo de Se nos solos do globo terrestre está entre 0,005 a 8000 mg kg⁻¹ (MORA et al., 2015), sendo a concentração média de 0,4 mg kg⁻¹ (FORDYCE, 2013; MALIK et al., 2012).

Contudo, segundo Fordyce (2007) há áreas no globo onde o solo é rico em Se, chamadas de áreas seleníferas, aonde as concentrações do elemento chegam a 1200 mg kg⁻¹. Em geral, os solos dessas áreas são originários de rochas sedimentares, com altos teores de matéria orgânica. Em contraste, solos que apresentam conteúdo menor que 0,5 mg kg⁻¹ de Se são ditos deficientes nesse elemento e sua formação se dá a partir de rochas magmáticas (BUJDOS et al., 2005).

No Brasil há uma carência de informações sobre os teores de Se em solos. Porém, alguns autores realizaram estudos e encontram as seguintes faixas de teores de Se em solos: São Paulo 0 - 800 µg kg⁻¹ (PAIVA NETO; GARGANTINI, 1956), 68 - 220 µg kg⁻¹ (FARIA

2009), < 0.089 - 1.612 mg kg⁻¹ (GABOS et al., 2014), Goiás e Minas Gerais 22 – 72 µg kg⁻¹ (CARVALHO et al., 2019), Goiás 1 - 8 µg kg⁻¹ (FICHTNER et al., 1990) e em Minas Gerais <0.30 - 5.97 (MATOS et al., 2017). Apesar da amplitude de valores encontrado nos trabalhos supracitados, o teor mediano de Se considerando todos esses trabalhos é de 70 µg kg⁻¹ de acordo com Reis et al. (2017).

O Se se apresenta em diferentes formas no solo de acordo com o seu estado de oxidação, podendo ser encontrado como Se (-II), (-I), (0), (IV) e (VI) (TOLU et al., 2011). As formas orgânicas de Se estão associadas a resíduos vegetais e animais no solo representados, principalmente, pelos aminoácidos selenometionina (SeMet), Selenocisteína (SeCys) e metilselenocisteína (MeSeCys) (THIRY et al., 2012).

Dentre as principais formas inorgânicas de Se, a que se apresenta mais solúvel e disponível no solo é o selenato (Se-VI) (PENG et al., 2017). Em solos tropicais, o selenito é adsorvido por óxidos de ferro e alumínio reduzindo a sua disponibilidade para os organismos vivos (Mayland et al., 1991). Em condições oxidantes o Se na forma de selenato se torna mais móvel e disponível em relação às condições ácidas redutoras (ANTONIADIS et al., 2017). Contudo, enfatiza-se que, tanto a mobilidade do Se quanto a sua biodisponibilidade no solo está associada, não apenas ao seu conteúdo total, mas também à espécie do elemento (PENG et al., 2017; WANG et al., 2013).

O processo de especiação natural do Se no solo é gerido por mecanismos relacionados à mineralização, imobilização, oxidação, redução e volatilização (FUNWIE, 2012). Além disso, segundo Alfthan et al. (2015), a biodisponibilidade e as formas químicas do elemento estão associadas à reações de adsorção, dessorção, precipitação, dissolução e formação de complexos de ligantes.

Diversos fatores inerentes ao solo como pH, condições redox, matéria orgânica, textura, condições biológicas e microbianas, conteúdo de Se e ânions competidores como o sulfato e o fosfato influenciam a biodisponibilidade de Se (LIU et al., 2014; XING et al., 2015; GONZALEZ-MORALES et al., 2017). Quanto a sorção de Se em solos, de maneira geral foi avaliado esse processo em diversos estudos (MOUTA et al., 2008; ABREU et al., 2011; GABOS et al., 2014) utilizando altas concentrações de selênio adicionadas na solução. Apesar de muito úteis e válidos, as doses usadas na maioria desses estudos não refletem as condições reais de doses visando a biofortificação de plantas. Estudos relativamente recentes tem apresentado reações de sorção de Se adicionando-o em concentrações possíveis para o processo de biofortificação (Lessa et al., 2016).

Sabendo-se que, inúmeros fatores e reações agindo de forma isolada ou em combinação afetam o destino e a disponibilidade de Se no solo, a escolha da espécie química de Se é uma informação importante para a realização de estudos que visam compreender os processos de transferência do elemento do solo para as plantas, como a biofortificação.

2.3. Selênio no sistema solo-planta

A base da ciclagem do Se em organismos vivos se fundamenta no seu comportamento biogeoquímico no sistema solo-planta. Portanto, o conteúdo de Se encontrado em alimentos vegetais está diretamente ligado ao teor de Se no solo. Assim, é de fundamental importância o monitoramento da transferência do Se do solo para planta (FORDYCE et al., 2000). Enfatiza-se que, no processo de biofortificação, onde se disponibiliza Se para as plantas, este pode passar de benéfico para tóxico, dependendo da quantidade suprida, da espécie do elemento e da espécie vegetal cultivada (DRAHONOVSKÝ et al., 2016).

É fato que a disponibilização de fertilizantes inorgânicos de Se é uma maneira eficaz para aumentar as concentrações de Se em culturas agrícolas, que, por consequência eleva o conteúdo de Se ingerido por humanos e animais, vindo a melhorar o seu estado de saúde (ALFTHAN et al., 2015). Boldrin et al. (2012) e Ramos et al., (2011) demonstraram que, as formas de Se, selenato e selenito diferem em relação a sua absorção e mobilidade nas plantas, sendo que, o Se na forma de selenato é mais facilmente transportado para a parte aérea, enquanto que, o Se na forma de selenito tende a se acumular nas raízes.

No Brasil a inclusão de Se em fertilizantes já está regulamentada pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), onde a recomendação descrita na instrução normativa de Nº 46, dita para os fertilizantes que contenham exclusivamente micronutrientes ou micronutrientes e macronutrientes secundários para aplicação no solo, as garantias mínimas de Se nesses produtos não podem ser inferiores a 30 mg kg^{-1} . Enquanto que, para as misturas de micronutrientes com fertilizantes mononutrientes, binários e ternários, para as misturas de micronutrientes mais macronutrientes secundários com fertilizantes mononutrientes, binários e ternários para aplicação via solo, via foliar e via fertirrigação e para as misturas exclusivas de micronutrientes com macronutrientes secundários para aplicação via foliar e via fertirrigação, a garantia mínima de Se nesses produtos não pode ser inferior a 300 mg kg^{-1} (MAPA, 2016).

A planta acumula Se do solo por vários processos que dependem da espécie do Se. O selenato se apresenta como uma forma de Se relativamente móvel na solução do solo, sendo,

portanto, mais absorvido pelas plantas (PILBEAM et al., 2015). Dessa maneira, a adição de selenato ao solo favorece o acúmulo mais eficiente de Se pelas plantas, sendo então mais eficiente que o selenito (FORDYCE, 2013; PILBEAM et al., 2015).

Além das condições químicas e físicas do solo que podem afetar a absorção de Se pelas plantas, a presença de ânions como sulfato e fosfato também tendem a afetar absorção, já que o Se compete pelos mesmos sítios de absorção (GOLOB et al., 2016; NAZ et al., 2015). Na planta, o sulfato com o selenato e o fosfato com o selenito compartilham das mesmas vias metabólicas durante o processo de assimilação (SORS et al., 2005).

A partir da disponibilização do Se na forma de selenato, este entra na planta via transportadores de sulfato na membrana plasmática das células da raiz (GUPTA; GUPTA, 2016). Nas raízes, após ação da ATP sulfúrilase (APS), o selenato é convertido em adenosina fosforoselenato (ATSe). Em seguida a adenosina fosforoselenato (ATSe) pela ação da enzima adenosina fosforoselenoreductase (APR) é convertida em selenito. Posteriormente, o selenito é convertido em selenetos pela ação da sulfito redutase e o selenato é convertido em selenocisteína (SeCys) pela O-acetilserina (tiol)liase (OAS) (RAMOS et al., 2011).

Sendo um composto estável a selenocisteína é transformada em outros compostos, como metilselenocisteína (MeSeCys), proteínas, entre outros. As etapas descritas anteriormente ocorrem nos plastídios celulares. No citosol ocorre a formação da selenometionina, que é transformada a partir da Sehomocys pela ação da metionina sintase. Ainda no citosol a SeMet pode se transformar em compostos voláteis, proteínas ou, entrar nos plastídios e se ligar à proteínas (RAMOS et al., 2011).

Se acumula-se principalmente na parte aérea da planta em relação à raiz (CABANNES et al., 2011). No entanto, o aumento da transferência de Se da raiz de plantas para a parte aérea depende da espécie de planta e forma de Se presentes no solo. O mecanismo de absorção, translocação e distribuição de Se pelas plantas está relacionado à concentração de sua forma química, assim como os atributos químicos e físicos do solo, além da variação genética de espécies de plantas (SOUZA et al., 2013). Por esta razão, o selenato de sódio é encontrado principalmente na parte aérea, enquanto o selenito é retido nas raízes (MALAGOLI et al., 2015).

2.4. Biofortificação de alimentos com Se e sua essencialidade para humanos e animais

O Se é elemento essencial para humanos e animais, sua essencialidade está relacionada com a sua participação na constituição estrutural de determinadas selenoproteínas

e ARNt (PILON-SMITS et al., 2009). Sendo o Se constituinte importante de vinte e cinco selenoproteínas, o mesmo desempenha funções fundamentais em diversos processos fisiológicos como no metabolismo de hormônios da tireoide, defesa antioxidante e sistema imunológico (RAYMAN, 2012).

A deficiência de Se na nutrição humana já se apresenta como uma questão importante à saúde há algumas décadas. Segundo D'amato et al. (2018) e Gao et al., (2018), a ingestão diária de Se está em uma faixa abaixo de 50 µg, e isso não ocorre apenas em países asiáticos, onde a base da alimentação é o arroz. Esse quadro é recorrente em regiões do globo onde os solos, de maneira geral, contêm baixa quantidade de Se. Portanto, os alimentos produzidos nesses locais são pobres nesse elemento (NOTHSTEIN et al., 2016). A faixa adequada diária de ingestão do Se para adultos está entre 50 µg (limite mínimo de ingestão) e 400 µg (limite máximo de ingestão) (EFSA, 2014).

Segundo Joy et al. (2014) e Stoffanellere Morse (2015), em torno de um bilhão de pessoas não tem em sua alimentação diária quantidades de Se necessária para sua nutrição adequada. Sendo a deficiência de Se, juntamente com Zn, Fe, I e vitamina A as que mais causam preocupação na população mundial, principalmente em países em desenvolvimento (MORAES et al., 2009).

Em uma abordagem que venha propiciar melhorias na nutrição e na saúde humana, a biofortificação de alimentos que consiste em um processo que visa aumentar os valores nutricionais das culturas de elementos essenciais a nutrição animal e humana, emergiu como uma estratégia eficaz e segura para aumentar os conteúdos de Se nos alimentos e assim também se aumenta a ingestão de alimentos enriquecidos com Se (BAÑUELOS et al., 2016; LOPES et al., 2017).

Ainda que o Se seja considerado um nutriente que não é essencial às plantas, em determinadas quantidades este pode apresentar efeito benéfico, aumentando o crescimento e o rendimento de algumas espécies de plantas, uma vez que, o mesmo possa vir a causar efeito antioxidante que protege a planta contra estresses oxidativos gerados por radicais livres do oxigênio (PANDEY; GUPTA, 2015).

Uma vez que, de modo geral, o Se chega aos seres humanos indiretamente pelo consumo dos alimentos, a carência desse elemento em solos agrícolas contribuem para a baixa ingestão de Se pela população (FORDYCE, 2013; JOY et al., 2015). A aplicação de Se ao solo é uma alternativa para assegurar que os alimentos ou forragens contenham esse elemento em concentrações adequadas para consumo humano e animal (Rayman, 2012).

Cuidados em relação a ingestão de Se devem ser adotados, uma vez que, tanto a deficiência desse elemento quanto o excesso causam distúrbios no sistema fisiológico de animais e humanos (FAIRWEATHER-TAIT et al., 2011). O Se ingerido em excesso pode causar doenças como hipotireoidismo (HATFIELD et al., 2014; RAYMAN, 2012). Já o Se ingerido em quantidades adequadas está associado a diversos benefícios como redução da incidência de câncer, doenças cardiovasculares, degeneração, bem como doenças virais, retardamento do início da AIDS em pacientes HIV-positivos (HATFIELD et al., 2014).

Deve-se atentar que a ingestão do Se também se associa a espécie que este é consumido, estando essas ligadas a biodisponibilidade ou toxicidade. Selênio nas formas inorgânicas como selenito e selenato de sódio podem atingir níveis de toxidez mais facilmente que espécies orgânicas como metilselenocisteína, selenometionina e selenocisteína que são benéficos para o homem (MARSCHALL et al., 2016). Logo, o processo de biofortificação, que permite a disponibilização do Se pelos alimentos, na forma orgânica, é fundamental (GAO et al., 2018).

Já se tem registros em alguns países da adição de Se em fertilizantes comerciais. Em estudos apresentados por Eichholzer (2003), a Finlândia nesse cenário apresenta-se como um exemplo do uso da inserção de Se, na forma de selenato de sódio, em fertilizantes desde 1984, para aumentar a ingestão de Se em alimentos de maneira a melhorar os valores nutricionais dos alimentos produzidos e a nutrição animal e humana, uma vez que os solos finlandeses apresentam baixos teores de Se (ALFTHAN et al., 2015).

Aro et al. (1995) relataram que após adoção dessa prática, a ingestão de Se pela população da Finlândia triplicou e sua concentração no plasma quase dobrou. Logo, a biofortificação se mostra como uma estratégia positiva para respostas a aplicação de Se em produtos de origem animal e vegetal (EUROLA et al., 2003). Estudo de biofortificação com Se em *Brassica* spp. mostrou que a aplicação de 50 μM de Se, na forma de Na_2SeO_4 , aumentou significativamente a síntese de um composto de Se-methylselenocysteine (AVILA et al., 2014). Assim, esses estudos apontam que o aumento do teor de Se em partes comestíveis de culturas que fazem parte da alimentação básica da população, está diretamente ligado a melhorias na saúde e redução de problemas associados a deficiência de Se.

2.5. Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. BRS FC104 – Embrapa

O Brasil possui destaque no cenário mundial em relação a produção de feijão, sendo atualmente o maior produtor de *Phaseolus vulgaris* L., o feijão comum. Segundo dados da

CONAB da safra de 2017/2018, a produção total de feijão foi em torno de 3.308 mil toneladas (CONAB, 2018).

O feijão é uma leguminosa que possui importante papel na segurança alimentar, estando presente na alimentação diária dos brasileiros, sendo então a principal fonte de proteínas e nutrientes depois da proteína animal, possuindo também um bom teor de fibras, minerais e vitaminas (SGARBIERI; WHITAKER, 1982; MAPA, 2018). O teor de ferro nos grãos dessa fabaceae é semelhante ao encontrado em bovinos e também é uma boa fonte de cálcio, fósforo, potássio, magnésio, cobre e zinco (SÁMMAN et al., 1999; BARAMPAMA; SIMARD, 1993), sendo um dos alimentos mais consumidos no país.

O consumo brasileiro de feijão está EM 17 kg pessoa⁻¹ano⁻¹ e sua ingestão contribui com 28% de proteína e 12% de calorias (SGARBIERI,1980, MAPA, 2018). Portanto, como este é um alimento básico da dieta alimentar brasileira e se apresenta como importante fonte de proteínas, o feijão pode funcionar como veículo de Se para a população brasileira.

No Brasil, a semeadura do feijão-comum ocorre durante todo o ano, de acordo com as características ambientais de cada local. Vale ressaltar que, há no seu processo de produção a predominância de sistemas com baixo índice de adoção de tecnologia e insumos. A produção brasileira ocorre em três safras: na 1ª safra ou safra das águas, a semeadura é realizada entre agosto e outubro;a 2ª safra ou safra da seca, é realizada entre janeiro e abril; e,a 3ª safra ou safra irrigada, a semeadura é realizada a partir de maio (CONAB, 2018)

No cultivo da 3ª safra é que ocorre o emprego de maiores tecnologias. É nessa safra também que se observa as maiores médias nacionais de produtividade. Em 2018, a 3ª safra foi responsável por ocupar uma área de aproximadamente 600,5 mil hectares, com produtividade média de 1.222 kg ha⁻¹. (CONAB, 2018).

A cultivar BRS FC 104 é originária do cruzamento das linhagens CNFE 8009 e VC5, feito pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) em 2006. Esta cultivar é classificada de acordo com seu ciclo produtivo (menor que 65 dias), super precoce, e foi lançada com objetivo de proporcionar impactos positivos nos sistemas de produção, uma vez que,a redução do ciclo reduz os custos de produção, além de possibilitar a colheita do feijão em períodos onde a oferta é menor (EMBRAPA, 2017).

O potencial produtivo da cultivar BRS FC 104 é de 3792 kg ha⁻¹. As plantas possuem arquitetura semiprostrada com hábito de crescimento indeterminado do tipo 3. Ainda, a cultivar apresenta baixa tolerância ao acamamento, as flores são brancas, na maturação fisiológica apresenta vagens avermelhadas e no ponto de colheita as vagens são amareladas.

Seus grãos são beges claros com estrias marrom claro, de forma oblonga reniforme, sendo curtos e sem brilho (EMBRAPA, 2017).

2.6. Capim mombaça (*Panicum maximum*)

A espécie *Panicum maximum*, cultivar mombaça foi lançada em 1993. Apresenta produção de até 41 t ha⁻¹ anode massa seca, possui o número médio de 4 folhas vivas, além de ser mais produtiva e apresentar uma menor sazonalidade de produção quando comparada a outros capins do mesmo gênero. O capim mombaça possui hábito de crescimento cespitoso, podendo chegar, em crescimento livre, até dois metros de altura (JANK et al., 2008).

Essa forrageira apresenta pouca tolerância à seca, é sensível a solos ácidos e exigente em alta fertilidade do solo, principalmente em fósforo. Apresenta digestibilidade acima de 60%, teor de proteína de 6% no inverno e 15% no verão. É uma forrageira de dia curto, com temperatura ótima de crescimento entre 30 e 35°C e temperatura base de 17,5°C (MORENO, 2004).

O capim mombaça se apresenta como uma das principais forrageiras produzidas em regiões de clima subtropical e tropical. Possui grande valor por apresentar elevada capacidade de produção de massa seca, qualidade de forragem, facilidade de estabelecimento e preferência pelos animais (TORRES et al., 2015).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização, coleta e preparo do solo

Para esse estudo, foi coletado, na camada de 0-20 cm, amostras de um Latossolo Vermelho-amarelo distrófico (EMBRAPA, 2013) de textura muito argilosa. Após destorroado, peneirado e seco em condições ambientais, amostras do solo foram encaminhadas para análises químicas e físicas (EMBRAPA, 1997), onde se obteve os resultados apresentados na tabela 1.

Cada parcela experimental constituiu-se de um vaso contendo 5 dm³ de solo. A partir da análise química do solo, foi efetuada a calagem para corrigir a acidez, visando atingir a saturação por bases de 65%. Para isso, fez-se o uso de calcário dolomítico com Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) de 95%. Após isso, o solo permaneceu incubado com

umidade próxima a 50% da capacidade de campo, sendo revolvido 3 vezes por semana por um período de 35 dias.

Tabela 1. Atributos químicos e físicos do solo.

Prof.	pH (Água)	P Mehlich-I	Fe	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺
cm		-----mg dm ⁻³ -----			-----cmol _c dm ⁻³ -----		
0 - 20	4,6	1,18	171,29	61,9	0,45	0,28	1,18
Prof.	H+Al	P-rem	Matéria Orgânica	Areia	Silte	Argila	
cm	cmol _c dm ⁻³	mg L ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----				
0 - 20	11,62	18,34	32,7	280	110	610	

Fonte: Do autor (2020).

3.2. Localização e delineamento experimental

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, localizada no Departamento de Ciência do Solo (DCS) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais, Brasil. Visando avaliar a biofortificação agrônômica do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar FC104- EMBRAPA (Super precoce), montou-se um experimento em blocos casualizados, em arranjo fatorial 5x6, sendo 5 doses de Se e 6 métodos de aplicação do Se, com 3 blocos.

A fonte de Se utilizada para a aplicação nos vasos foi o selenato de sódio (Na₂SeO₄) e as doses de Se avaliados foram: 0,0, 0,2, 0,4, 0,6 e 0,8 mg dm³. Os 6 métodos de fornecimento de Se para as plantas de feijoeiro comum foram: i) aplicação de mono-amônio-fosfato (10-46-00) enriquecido com Se (MAP-Se) via solo na semeadura; ii) aplicação de ureia (44-00-00) enriquecida com Se (Ureia-Se) via solo 22 dias após a semeadura; iii) pulverização de solução de selenato de sódio diretamente na folha da planta, sendo metade da dose no florescimento e a outra metade no enchimento de grãos (Foliar-Se); iv) aplicação de metade da dose de Se com o MAP na semeadura e a outra metade da dose de Se via ureia, 22 dias após a semeadura (MAP-Se + Ureia-Se); v) metade da dose de Se aplicada via MAP na semeadura e a outra metade via pulverização foliar (MAP-Se + Foliar-Se); e, vi) metade da dose de Se aplicada via ureia 22 dias após a semeadura e a outra metade via pulverização foliar (Ureia-Se + Foliar-Se). Enfatiza-se que a dose de Se aplicada via folha foi equivalente àquela aplicada via solo, ou seja, as plantas que estavam em cada vaso receberam doses equivalentes via solo ou folha.

3.3. Enriquecimento dos fertilizantes com Se

Para a obtenção dos fertilizantes MAP e ureia enriquecidos com Se, 0,4 g de Dietanolamina (adesivo orgânico inerte), 4 gotas de corante, o selenato de sódio e o fertilizante foram adicionados a um Becker e homogeneizados. O emprego do corante foi utilizado para auxiliar visualmente na homogeneização da mistura. As quantidades de selênio via selenato de sódio, em gramas por quilograma de adubo ou, em gramas por litro de solução de pulverização, são apresentados na tabela 1. Vale ressaltar que as quantidades de Se aplicadas em cada tratamento foram calculadas com base nas doses de P e N aplicadas no vaso (200 mg kg⁻¹ e 300 mg kg⁻¹, respectivamente), de acordo com Malavolta (1981). O volume de calda de pulverização foi de 50 mL por vaso.

Tabela 2. Concentração de Se nos adubos e na calda de pulverização.

Doses Se mg dm ⁻³	Selênio nos fertilizantes/calda		
	MAP (10-46-00)	Ureia (44-00-00)	Pulverização*
	----- g kg ⁻¹ -----		g L ⁻¹
0,1	0,1	0,22	0,005
0,2	0,2	0,44	0,010
0,3	0,3	0,66	0,015
0,4	0,4	0,88	0,020
0,6	0,6	1,33	0,030
0,8	0,8	1,77	0,040

* A dose aplicada na pulverização foi dividida em duas aplicações, sendo no florescimento e no enchimento de grãos.

Fonte: Do autor (2020).

3.4. Cultivo do feijoeiro

O cultivo do feijoeiro ocorreu no período de abril a junho de 2018, em um ciclo total de 62 dias. A adubação de semeadura seguiu a recomendação de Malavolta (1981), sendo: nitrogênio (N) = 300 mg kg⁻¹; P = 200 mg kg⁻¹; K = 150 mg kg⁻¹ e S = 50 mg kg⁻¹; B = 0,5 mg kg⁻¹; Cu = 1,5 mg kg⁻¹; Mn = 3,6mg kg⁻¹; Mo = 0,1 mg kg⁻¹ e Zn = 5mg kg⁻¹.

A fonte de fósforo (P) e nitrogênio (N) aplicadas na semeadura foi MAP enriquecido com Se. O K foi suprido por sulfato de potássio (K₂SO₄). As fontes de micronutrientes foram: sulfato de cobre (CuSO₄.5H₂O); sulfato de zinco (ZnSO₄.7.H₂O); ácido bórico (H₃BO₃); molibdato de amônio ((NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O) e sulfato de manganês (MnSO₄.H₂O). A adubação de cobertura foi realizada 22 dias após a semeadura, utilizando sulfato de potássio (K₂SO₄) para fornecer o restante da recomendação de K e a ureia enriquecida com Se. Com

exceção do MAP e da ureia, todos os outros nutrientes foram aplicados via solução. Para os métodos onde o Se não seria disponibilizado via semeadura e via adubação de cobertura, foram aplicados MAP e ureia sem Se para suprir as necessidades da planta de P e N.

Em cada vaso, foram semeadas seis sementes de feijão. A emergência total ocorreu aos 6 dias após semeadura e o desbaste nas unidades experimentais foi feito 12 dias após semeadura com as plantas já estabelecidas, deixando 2 plantas por vaso. Durante a condução do experimento, a umidade do solo foi mantida próxima à capacidade de campo com a irrigação feita com água deionizada, de maneira a manter uma mesma quantidade de água oferecida a todas as plantas.

Com a finalidade de se avaliar o conteúdo de Se individualmente em cada estrutura da parte aérea da planta do feijoeiro, além do grão, coletou-se separadamente as folhas, as vagens e o caule, os quais foram armazenados em sacos de papel devidamente identificados. Em laboratório, foram avaliados o número de vagens por planta, o número de grãos de feijão por vagem, bem como, a soma do número total de vagens e de grãos de cada parcela experimental (vaso). Em seguida, os materiais foram colocados em estufa de ventilação forçada a 65°C por 72 horas para determinação da massa seca. Após esse período, amostras de cada material foram moídas e armazenadas adequadamente para as análises químicas.

3.5. Cultivo do capim mombaça

Visando avaliar o efeito residual do Se no solo após o cultivo do feijoeiro, os vasos que receberam os tratamentos MAP-Se, Ureia-Se, MAP-Se + Ureia-Se, MAP-Se + Foliar-Se e Ureia-Se + Foliar-Se foram cultivados com a forrageira capim mombaça. Os vasos onde houve, durante o cultivo de feijão, a aplicação do Se 100% via pulverização (Foliar-Se) foram descartados.

As adubações de plantio e cobertura, bem como, a condução do estudo ocorreram de forma semelhante ao estudo do feijoeiro. A exceção, foi a utilização dos fertilizantes MAP e ureia sem adição de Se. Em cada vaso, foram semeadas 0,5 g de sementes de capim mombaça. A emergência total ocorreu aos 5 dias após semeadura e o desbaste nas unidades experimentais foi realizado deixando 4 plantas por vaso.

Trinta dias após a emergência das plantas coletou-se a parte aérea do capim mombaça. Após isso, o material foi colocado em sacos de papel, devidamente identificados, e colocados em estufa de ventilação forçada a 65 °C por 72 horas para determinação da massa seca. Em

seguida, o material foi moído e armazenado adequadamente para serem usados na etapa posterior das análises químicas.

3.6. Determinação do teor de Se

Para a determinação do teor de Se nas estruturas da parte aérea da planta de feijoeiro e de capim mombaça, 0,5 g das amostras foram colocadas em tubos digestores de microondas, onde foram adicionados 5 mL de ácido nítrico. Após isso, as amostras ficaram em repouso por um período de 12 h. Em seguida, foram digeridas em forno micro-ondas (CEM/ modelo MARS 5 XPRESS), conforme método EPA3051A (USEPA, 2007) a 175°C, 0,76 Mpa por 15 min. Após o resfriamento, o extrato ácido foi transferido para frascos plásticos e adicionou-se 5mL de água deionizada. Os frascos foram armazenados adequadamente sob refrigeração e posteriormente os extratos foram diluídos com adição de água deionizada para determinação do teor de Se. A concentração de Se foi determinada por espectrometria de emissão atômica com forno de grafite – GFAAS (AAAnalyst™ 800 AAS, Perkin Elmer). Para verificar a qualidade das análises, em cada bateria de digestão, foi incluída uma amostra padrão com concentração de Se conhecida (White Clover) com recuperação média de 82% (n: 10) e também, uma amostra branco contendo apenas o ácido nítrico.

3.7. Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANAVA) e ao teste de comparação de médias Scott-Knott, a 5 % de probabilidade por meio do programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Enriquecimento do feijoeiro com Se

Não houve interação significativa entre os métodos de aplicação de Se e as doses de Se, bem como, os fatores isolados para as variáveis número de vagens, número de grãos, número de grãos por vagem, massa seca de folhas, massa seca de vagens, massa seca de caule e massa seca de grãos (Tabelas 1 e 2 do anexo). Esses resultados indicam potencial positivo para biofortificação agrônômica do feijoeiro, uma vez que o processo de biofortificação visa o

enriquecimento de alimentos, sem contudo, afetar negativamente o desenvolvimento da planta (DRAHONOVSKÝ et al., 2016).

Nota-se que, após a aplicação do Se via os diferentes métodos avaliados, as concentrações de Se no caule, na folha, na vagem e nos grãos aumentaram linearmente com o incremento das doses aplicadas ($P < 0,01$), obtendo-se elevados valores de R^2 (Tabela 3 do anexo).

Os resultados encontrados neste estudo demonstram que a aplicação de doses crescentes de Se podem causar aumento significativo da concentração de Se em culturas agrícolas (e.g., feijoeiro comum), o que corrobora com resultados encontrados em outros estudos realizados por Duclay et al., (2009) e Broadley et al., (2010).

A figura 1 apresenta os ajustes do modelo de regressão linear obtidos para os teores de Se nos grãos de feijão em função das doses de Se aplicadas para cada método avaliado. Tendo em vista que a escala do eixo y (concentração de Se nos grãos) está igual em todos os gráficos mostrados na figura 1, observa-se que, os métodos testados foram eficientes em aumentar os teores de Se nos grãos, na seguinte ordem crescente: MAP-Se < MAP-Se + Foliar-Se < Foliar-Se ~ Ureia-Se < MAP-Se + Ureia-Se ~ Ureia-Se + Foliar-Se.

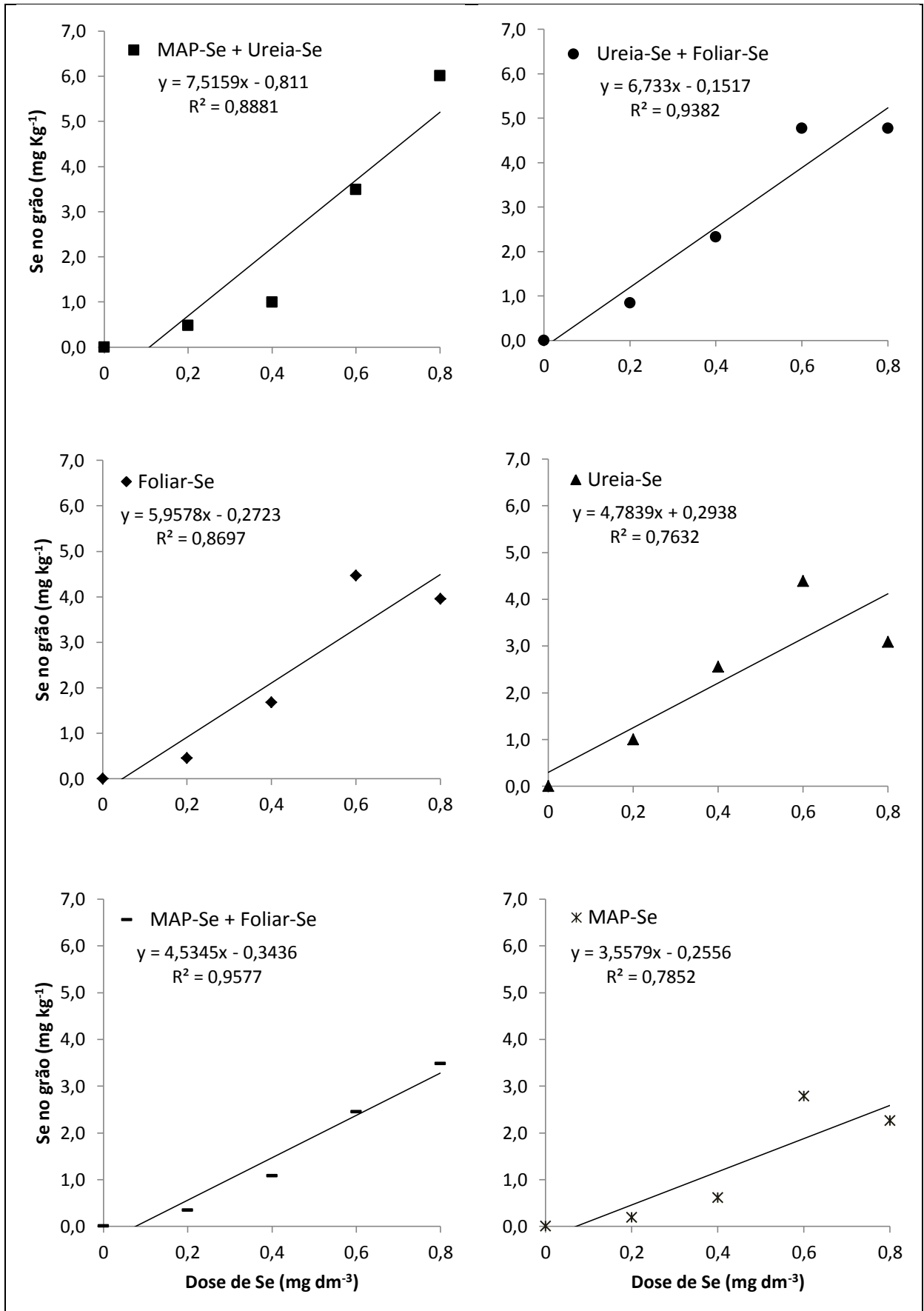
A concentração de Se no grão do controle (dose 0 de Se) foi abaixo do limite de detecção (Figura 1 e 2). Nota-se que a dose de $0,2 \text{ mg dm}^{-3}$ propiciou aumento no teor de Se nos grãos, atingindo concentrações variando de 200 a $1000 \mu\text{g kg}^{-1}$, dependendo do método de aplicação avaliado. Em grãos valores menores que $0,05 \text{ mg kg}^{-1}$ de Se indicam a necessidade de biofortificação para essa cultura, principalmente por ser um alimento básico da dieta brasileira (MORAES, 2008).

Com exceção da dose de $0,2 \text{ mg dm}^{-3}$, a concentração de Se nos grãos de feijão variou de uma dose para outra em relação aos métodos de aplicação (Figura 2). Para as doses de $0,4 \text{ mg dm}^{-3}$ e $0,6 \text{ mg dm}^{-3}$ de Se disponibilizado, os métodos com os melhores desempenho e/ou que propiciaram maior eficiência em acumular Se nos grãos foram Ureia-Se, Foliar-Se e Ureia-Se + Foliar-Se. Já, para a maior dose, o método com o melhor desempenho foi o MAP-Se + Ureia-Se.

Ressalta-se que as diferenças na eficiência de cada método estudado em produzir grãos de feijão ricos em Se pode ser decorrente da disponibilidade de Se para a planta em épocas e vias metabólicas diferentes durante o seu ciclo, sendo portanto explicado o melhores resultados nos métodos com aplicação via ureia devido a fase que a mesma é disponibilizada a planta.

Em estudo realizado com a aplicação de ureia enriquecida com Se em épocas diferentes de desenvolvimento da planta, obteve-se maiores concentrações de Se em grãos de arroz quando a planta estaria com suas raízes já bem desenvolvidas e com elevada atividade para absorção de nutrientes e maior absorção de Se pela planta nesta fase (PREMARATHNA et al., 2012).

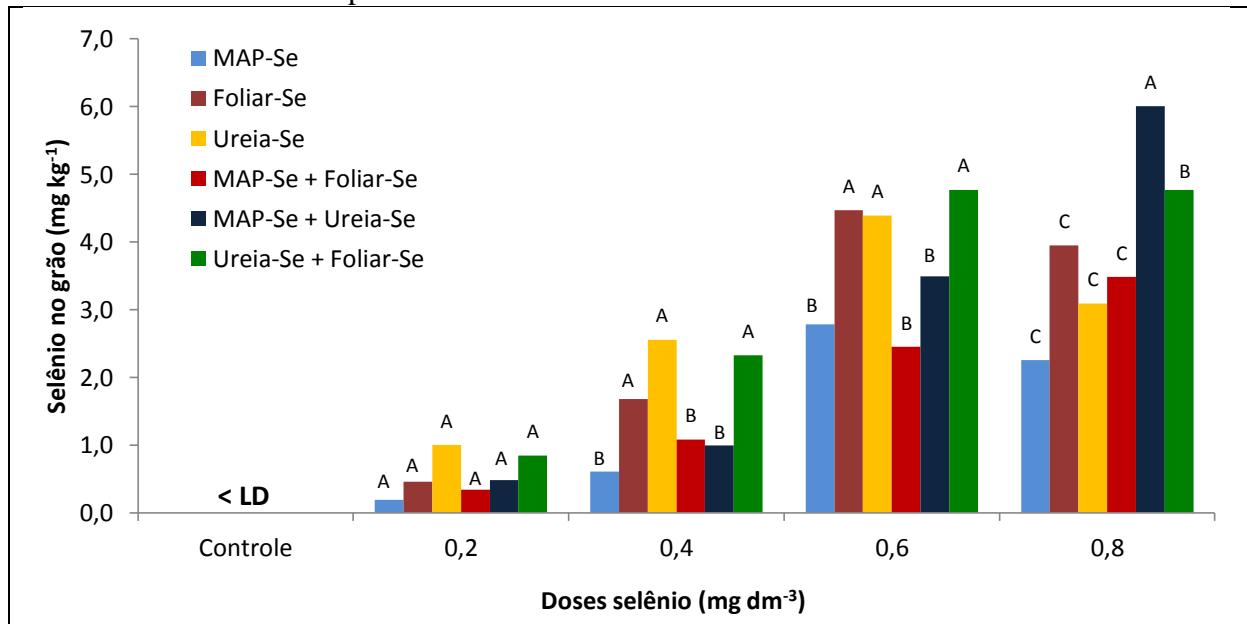
Figura 1. Teor de selênio nos grãos de feijão de acordo com os métodos de aplicação de Se.



Fonte: Do autor (2020).

Além disso, os maiores valores de concentração de Se no grão observados para os métodos com Se disponibilizado via ureia podem ser explicados pela hidrólise enzimática da ureia no solo, se convertendo a carbonato de amônio, que se decompõe liberando NH_3 e CO_2 . Em sequência, o NH_3 reage com a água formando NH_4OH , elevando o pH do seu entorno (VOCK, 1959), favorecendo a absorção do Se, uma vez que, o mesmo fica mais disponível para as plantas em meio alcalino.

Figura 2. Concentração de Se no grão de feijão de acordo com os métodos e as doses de Se utilizados no estudo. Médias seguidas da mesma letra maiúscula para os métodos de aplicação dentro de cada dose de Se não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.



Fonte: Do autor (2020).

Os dados referentes ao acúmulo total de Se verificado nos compartimentos da parte aérea do feijoeiro (caule, vagem, folha e grão) para os diferentes tratamentos estudados encontram-se na Figura 3. Nota-se que o acúmulo total de Se, bem como a distribuição do Se dentro da planta variaram em função das doses e métodos de aplicação avaliados. No geral, os tratamentos que envolveram a aplicação de Se via folha e via a ureia enriquecida com Se e, ainda, a combinação dessas duas estratégias obtiveram os maiores valores de acúmulo de Se para todas as doses estudadas. Dentre os métodos que tiveram maiores acúmulos, para a dose de $0,2 \text{ mg dm}^{-3}$, verifica-se que o Se acumulou-se mais na folha, com exceção da ureia, onde o maior acúmulo encontra-se no grão (Figura 3 e Figuras 1 e 2 do anexo).

Pensando nos métodos que propiciaram os maiores acúmulos de Se e na distribuição deste Se entre os compartimentos da parte aérea avaliados, nota-se que, para as doses de $0,4$ e

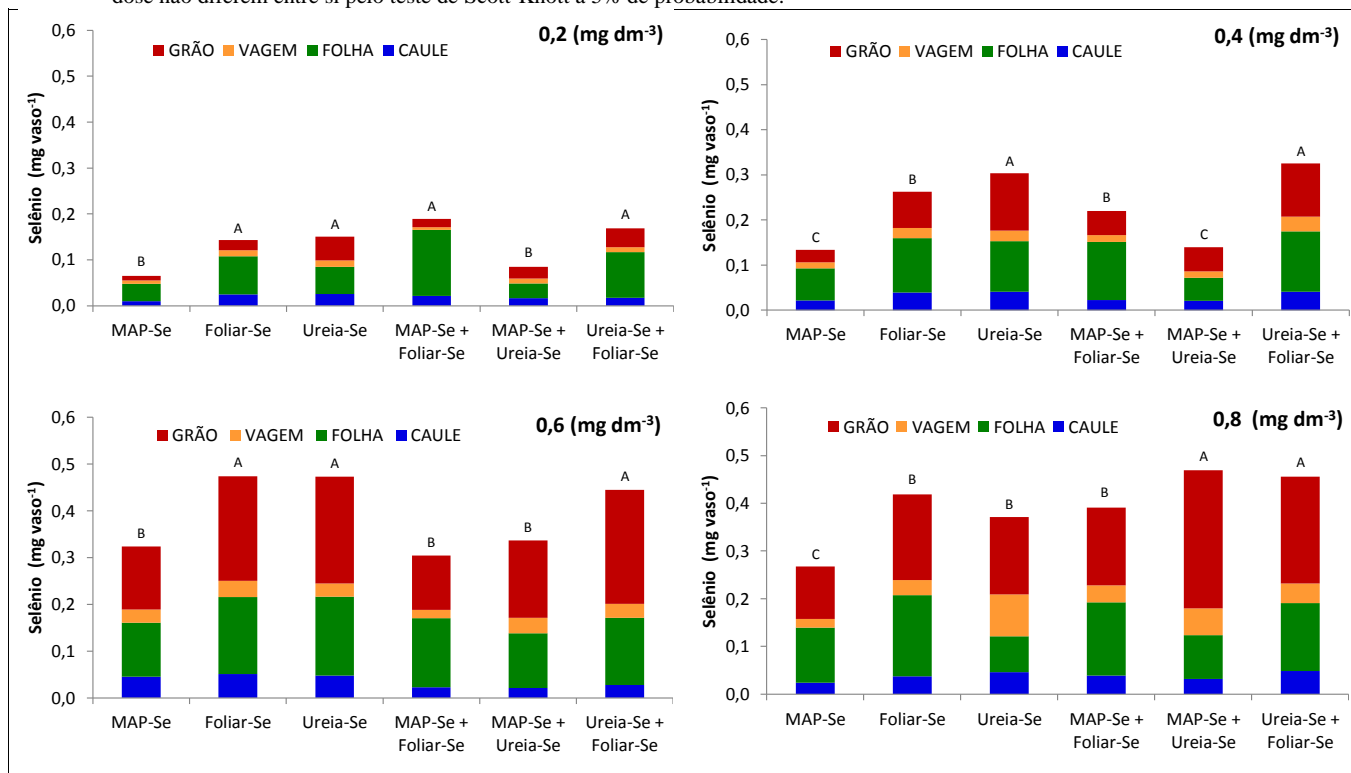
0,6 mg dm⁻³, o Se foi igualmente distribuído na folha e no grão, com exceção do método Ureia-Se + Foliar-se na dose de 0,6 mg dm⁻³ (Figura 3). Por outro lado, para a dose de 0,8 mg dm⁻³, os maiores acúmulos foram observados nos métodos MAP-Se + Ureia-Se e Ureia-Se + Foliar-Se, sendo o Se acumulado em maiores proporções nos grãos em relação a folha, caule e vagem (Figura 3 e Figuras 1 e 2 do anexo).

De acordo com os resultados encontrados (Figura 3), a absorção e translocação do Se pela planta de feijoeiro varia de acordo com os métodos e as doses em que o Se foi disponibilizado à planta. Esses resultados são condizentes com aqueles encontrados em outros trabalhos, onde se enfatiza que o conteúdo de Se encontrado em alimentos vegetais está diretamente ligado ao teor de Se disponibilizado via solo e foliar. (FORDYCE et al., 2000)

A distribuição do Se nos componentes da planta depende da espécie, fase de desenvolvimento e estágio fisiológico (CABANNES et al., 2011), com o Se possuindo maior tendência de acumular-se nas sementes, seguidas das folhas e, por último, no caule e seu teor diminui à medida que o estado de maturação das plantas avança, uma vez que, no processo de maturação, a planta transloca o Se das folhas para as sementes (CORREIA, 1986). Além disso, a distribuição do Se nas plantas também está associada à forma, a concentração e a disponibilidade do elemento na planta, além da presença de outros elementos como o sulfato (SOUZA et al., 1998).

Dentro da planta, os mecanismos de absorção, translocação e redistribuição de Se relacionam-se à concentração de sua forma química, que por sua vez, está diretamente ligada as doses que o Se é disponibilizado (SOUZA et al., 2013). Na planta, o sulfato compartilha das mesmas vias metabólicas que o selenato durante o processo de absorção, portanto a concentração de sulfato pode influenciar na absorção e posterior translocação do Se dentro da planta (SORS et al., 2005). Em estudo com arroz foram encontrados maiores teores de selênio nas folhas de arroz do que nos grãos quando o mesmo foi aplicado via foliar, corroborando com a tendência de distribuição do Se na planta apresentada neste estudo (PREMARATHNA et al., 2012).

Figura 3. Acúmulo de Se em mg vaso^{-1} na parte aérea do feijoeiro. Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre os métodos dentro de cada dose não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.



Fonte: Do autor (2020).

4.2. Efeito residual do Se no solo sobre o capim mombaça

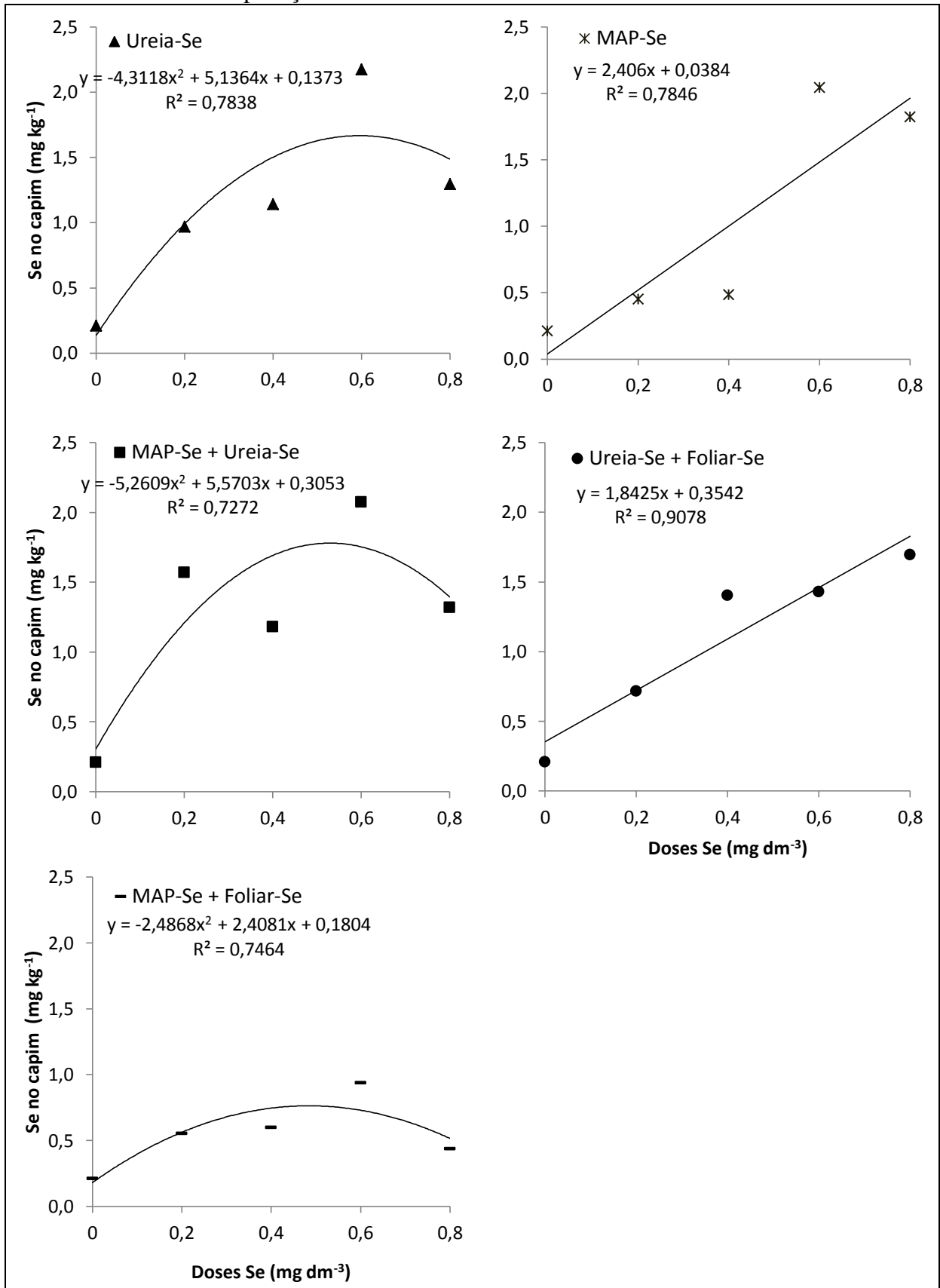
Não foram observadas interações significativas entre os métodos de aplicação e as doses de Se, bem como, para esses fatores isolados em relação a massa seca da parte aérea do capim ($P < 0,01$) (Tabela 4 do anexo).

Os resultados evidenciam que quantidades crescentes de Se aplicadas no solo proporcionaram aumentos significativos dos teores desse elemento na massa seca da parte aérea da forrageira (Figura 4). Ainda, observa-se que, quando o Se foi aplicada via Ureia-Se ou MAP-Se, houve maiores concentrações de Se no capim em relação ao parcelamento dessa dose, como ocorreu nos tratamentos Ureia-Se + MAP-Se, Ureia-Se + Foliar-Se e MAP-Se + Foliar-Se

Uma vez que o teor de Se disponível no solo para ser absorvido depende da quantidade residual desse elemento no vaso após o cultivo do feijoeiro, as maiores concentrações de Se na massa seca do capim mombaça foram encontradas para os tratamentos em que houve os menores acúmulos de Se na parte aérea do feijoeiro (Figuras 3 e 4), com ênfase para o método MAP-Se.

Nota-se que a concentração de Se no capim (Figura 4) é menor que no grão de feijão (Figura 1). Essa diferença no teor de selênio é explicada pela menor disponibilidade de Se no solo, uma vez que parte do que foi disponibilizado ao solo já foi absorvido pela cultura anterior (STROUD et al., 2010). Ainda, devido ao Se se ligar as proteínas no seu processo de assimilação, o que sugere a possibilidade de as fabáceas terem um maior potencial para biofortificação com Se (RAMOS et al., 2011), já que as fabáceas apresentam maior teor de proteína cerca de 28% (SGARBIERI, 1980) quando comparadas às poáceas, que apresentam entre 6% e 15% de proteínas dependendo da época de cultivo (MORENO, 2004).

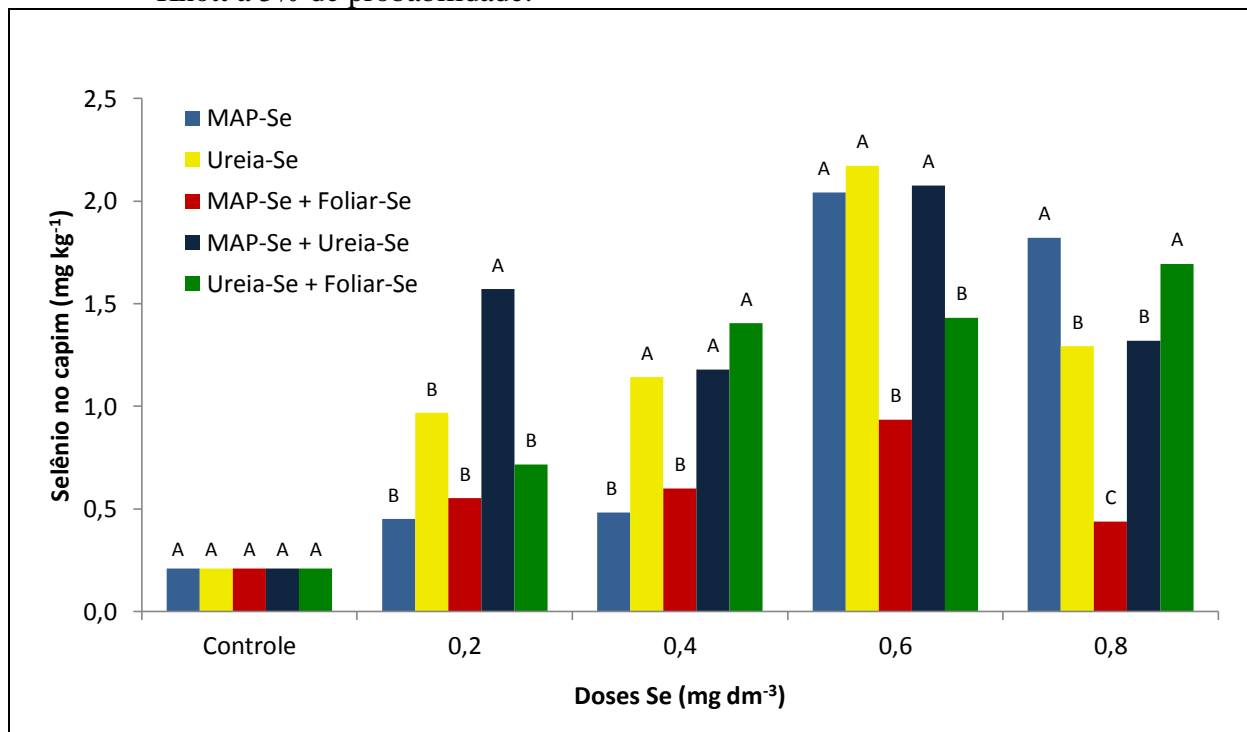
Figura 4. Concentração de Se na parte aérea do capim mombaça de acordo com as doses e os métodos de aplicação de Se.



Fonte: Do autor (2020).

A concentração de Se na parte aérea do capim mombaça apresentou comportamento variado de uma dose para outra quanto aos diferentes métodos avaliados (Figura 5). Independente das doses, os métodos MAP-Se, Ureia-Se e MAP-Se + Ureia-Se, verificou-se maiores concentrações de Se no capim. Portanto, o Se disponibilizado na forma de selenato ou seja disponibilizado em uma forma inorgânica para as raízes, permite uma maior mobilidade do elemento via xilema (LI et al., 2008) e maior translocação para parte aérea, o que facilita a chegada desse a parte aérea do capim mombaça.

Figura 5. Concentração de Se no capim mombaça de acordo com os métodos e as doses de Se utilizados no estudo. Médias seguidas da mesma letra maiúscula para os métodos de aplicação dentro de cada dose de Se não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.



Fonte: Do autor (2020).

Ainda, ressalta-se que a disponibilização de fertilizantes inorgânicos de Se é uma maneira eficaz para aumentar as concentrações de Se em culturas agrícolas, que, por consequência eleva o conteúdo de Se ingerido por humanos e animais, vindo a melhorar o seu estado de saúde (ALFTHAN et al., 2015).

5 CONCLUSÕES

O fornecimento de Se possibilitou o aumento dos teores de Se dos grãos de feijão e da parte aérea do capim mombaça, havendo variações nesta eficiência entre os métodos de aplicação avaliados, sendo os métodos Ureia-Se, Foliar-Se e Ureia-Se + Foliar-Se os mais eficientes.

Os métodos que receberam a aplicação de Se via solo apresentam potencial de efeito residual, principalmente para os métodos MAP-Se, Ureia-Se e MAP-Se + Ureia-Se, uma vez que foi verificado incremento nos teores de Se na parte aérea do capim mombaça cultivado em sucessão ao feijoeiro.

Evidencia-se que a aplicação de Se, na forma de selenato de sódio via fertilizantes disponibilizados no solo e via foliar, viabiliza o aumento do conteúdo de Se no grão de feijão sendo uma estratégia viável no processo de biofortificação com selênio.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L.B., CARVALHO, G.S., CURI, N., GUILHERME, L.R.G., MARQUES, J.J.G.S.M. Sorção de selênio em solos do bioma Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:1995- 2003, 2011.
- ALFTHAN, G., EUROLA, M., EKHOLM, P., VENEALEAINEN, E.-R., ROOT, T., KORKALAINEN, K., HARTIKAINEN, H., SALMINEN, P., HIETANIEMI, V., ASPILA, P., ARO, A. Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: from deficiency to optimal selenium status of the population. *J. Trace Elem. Med. Biol.* 31, 142e147, 2015
- ANDRADE, F.R., SILVA, G.N., GUIMARÃES, K.C., BARRETO, H.B.F., SOUZA, K.R.D. Selenium protects rice plants from water deficit stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 164, 562 – 570, 2018.
- ANTONIADIS, V., LEVIZOU, E., SHAHEEN, S.M., OK, Y.S., SEBASTIAN, A., BAUM, C., PRASAD, M.N., WENZEL, W.W., RINKLEBE, J. Trace elements in the soil- plantinter face: phytoavailability, translocation, and phytoremediation A review. *Earth Sci. Rev.* 171, 621e645, 2017.
- ARO, A.; ALFTHAN, G.; VARO, P. Effects of supplementation of fertilizer on human selenium status in Finland. *Analyst.*, v. 120, p. 841-843, 1995.
- AVILA, F.W., YANG, Y., FAQUIN, V., RAMOS, S.J., GUILHERME, L.R., THANNHAUSER, T.W., et al. Impact of selenium supply on Se-methylselenocysteine and glucosinolate accumulation in selenium-biofortified Brassica sprouts. *Food Chem.* 165, 578586, 2014.

- BARAMPAMA, Z.; SIMARD, R.E. Nutrient composition, protein quality and antinutritional factors of some varieties of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) grown in Burundi. *Food Chemistry*, v. 47, p. 159-167, 1993.
- BOLDRIN, P. F. Biofortificação agrônômica com selênio em arroz. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras. 63p. 2011.
- BOLDRIN, P. F., FAQUIN, V., RAMOS, S. J. GUILHERME, L. R. G., BASTOS, C. E. A., CARVALHO, G. S., & COSTA, E. T. D.S. Selenate and selenite on yield and agronomic biofortification with selenium in rice. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47, 831-837, 2012.
- BAÑUELOS, G.S., ARROYO, I.S., DANGI, S.R., ZAMBRANO, M.C. Continued selenium biofortification of carrots and broccoli grown in soils once amended with Se-enriched *S. Pinnata*. *Front. Plant Sci.* 2016.
- BRANDT, J.E., BERNHARDT, E.S., DWYER, G.S., DI GIULIO, R.T. Selenium ecotoxicology in freshwater lakes receiving coal combustion residual effluents: a North Carolina example. *Environ. Sci. Technol.* 51, 2418e2426, 2017.
- BROADLEY, M.R.; ALCOCK, J.; ALFORD, J.; CARTWRIGHT, P.; FOOT, I.; FAIRWEATHER-TAIT, S.J.; HART, D.J.; HURST, R.; KNOTT, P.; MCGRATH, S.P.; MEACHAM, M.C.; NORMAN, K.; MOWAT, H.; SCOTT, P.; STROUD, J.L.; TOVEY, M.; TUCKER, M.; WHITE, P.J.; YOUNG, S.D. & ZHAO, F.J. Selenium biofortification of high yielding winter wheat (*Triticum aestivum* L.) by liquid or granular Se fertilisation. *Plant Soil*, 332:5-18, 2010.
- BUJDOS, M., MULOVA, A., KUBOVA, J., MEDVED, J. Selenium fractionation and speciation in rocks, soils, waters and plants in polluted surface mine environment. *Environ. Geol.* 47, 353e360, 2005.
- CABANNES, E., BUCHNER, P., BROADLEY, M.R., HAWKESFORD, M.J. A comparison of sulfate and selenium accumulation in relation to the expression of sulfate transporter genes in *Astragalus* species. *Plant Physiol.* 157, 2227e2239, 2011.
- CONAB, Acompanhamento da safra brasileira de grãos, safra 2017/2018. v.5, N. 10., 2018.
- CORREIA, A.A.D. Bioquímica nos solos, nas pastagens e forragens. Lisboa: Fund. Calouste Gulbenkian, p. 240-254, 1986.
- CUVARDIC, M.S. Selenium in Soil. *Zbornik matice srpske za prirodnu nauku*, p. 23e37, 2003.
- D'AMATO, R., FONTANELLA, M.C., FALCINELLI, B., BEONE, G.M., BRAVI, E., MARCONI, O. Selenium biofortification in Rice (*Oryza sativa* L.) sprouting: effects on seed yield and nutritional traits with focus on phenolic acid profile. *J. Agric. Food Chem.* 66, 4082-4090, 2018.
- DRAHOŇOVSKÝ, J., SZÁKOVÁ, J., MESTEK, O., TREMLOVÁ, J., KAŇA, A., NAJMANOVÁ, J. Selenium uptake, transformation and inter-element interactions by selected wildlife plant species after foliar selenate application. *Environ. Exp. Bot.* 125, 12-19, 2016.

EFSA. Scientific Opinion on the safety and efficacy of DL-selenomethionine as a feed additive for all animal species. *EFSA J.* 12, 3567, 2014.

DUCSAY L., LOŽEK O., VARGA L. The influence of selenium soil application on its content in spring wheat. *Plant, Soil and Environment*, v.55, p. 80–84, 2009.

EICHHOLZER, M. Micronutrient deficiencies in Switzerland: causes and consequences. *Journal of Food Engineering*, v. 56, n. 2-3, p. 171-179, fev. 2003.

EL-RAMADY, H.R., DOMOKOS-SZABOLCSY, E., SHALABY, T.A., PROKISCH, J., FARI, M. Selenium in Agriculture: Water, Air, Soil, Plants, Food, Animals and Nanoselenium, CO₂ Sequestration, Biofuels and Depollution. Springer, pp. 153e232, 2015.

EUROLA, M.; ALFTHAN, G.; ARO, A.; EKHOLM, P.; HIETAMNIEMI, V.; RAINIO, H.; RANKANEN, R.; VENALAINEN, E. Results of the Finnish selenium program 2000-2001. 45p.2003.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. BRS FC 104: Cultivar de feijão-Comum carioca superprecoce. Comunicado técnico, nº 239, 2017.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997.

FAIRWEATHER-TAIT, S.J., BAO, Y., BROADLEY, M.R., COLLINGS, R., FORD, D., HESKETH, J.E., HURST, R. Selenium in human health and disease. *Antioxidants RedoxSignal.* 14, 1337e1383, 2011.

FARIA, L.A. Levantamento sobre selênio em solos e plantas do Estado de São Paulo e sua aplicação em plantas forrageiras. USP/FZEA. Pirassununga. 2009.

FICHTNER, S.S., PAULA, A.N., JARDIN, E.C., SILVA, E.C., LOPES, H.O.S. Estudo da composição mineral de solos, forragens e tecido animal de bovinos do município de Rio Verde, Goiás. IV - cobre, molibdênio, selênio. *Anais das Escolas de Agronomia e Veterinária* 20, 1-6. 1990.

FORDYCE, F., GUANGDI, Z., GREEN, K., XINPING, L. Soil, grain and water chemistry in relation to human selenium-responsive diseases in Enshi District, China. *Appl. Geochem.* 15, 117e132, 2000.

FORDYCE, F.M. Selenium Deficiency and Toxicity in the Environment, Essentials of Medical Geology. Springer, pp. 375e416, 2013.

FORDYCE, F. Selenium Geochemistry and Health. *Ambio: a Journal of the Human Environment*, Stockholm, v. 36, n. 1, p. 94-97, 2007.

FUNWIE, A.V. Effect of Soil Properties on Availability and Mobility of Selenium. Faculty of Bioscience Engineering. University of Gent, Belgium, pp. 1e65, 2012.

GABOS, M. B.; GOLDBERG, S.; ALLEONI, L. R. F. Modeling selenium (IV and VI) adsorption envelopes in selected tropical using the constant capacitance model. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 9999:1-11, 2014.

GAO, H.H., CHEN, M.X., HU, X.Q., CHAI, S.S., QIN, M.L., CAO, Z.Y. Separation of selenium species and their sensitive determination in rice samples by ion-pairing reversed-phase liquid chromatography with inductively coupled plasma tandem mass spectrometry. *J. Sep. Sci.* 41, 432–439, 2018.

GOLOB, A., GADZO, D., STIBILJ, V., DJIKIC, M., GAVRIC, T., KREFT, I., GERM, M. Sulphur interferes with selenium accumulation in Tartary buckwheat plants. *Plant Physiol. Biochem.* 108, 32e36, 2016.

GONZALEZ-MORALES, S., PEREZ-LABRADA, F., GARCÍA-ENCISO, E.L., LEJIA-MARTÍNEZ, P., MEDRANO-MACÍAS, J., DAVILA-RANGEL, I.E., JUAREZ-MALDONADO, A., RIVAS-MARTÍNEZ, E.N., BENAVIDES-MENDOZA, A. Selenium and sulfur to produce *Allium* functional crops. *Molecules* 22, 558, 2017.

GONZAGA, I. B. Avaliação nutricional relativa ao selênio em crianças com dieta enriquecida de castanha-do-brasil. São Paulo, Tese (Doutorado) Faculdade de Ciências Farmacêuticas. Universidade de Sao Paulo, 161p. 2002.

GUPTA, M., GUPTA, S. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Front. Plant Sci.* 2016.

HATFIELD, D.L., TSUJI, P.A., CARLSON, B.A., GLADYSHEV, V.N. Selenium and selenocysteine: roles in cancer, health, and development. *Trends Biochem. Sci.* 39, 112–120, 2014.

JANK, L.; RESENDE, R.M.S.; VALLE, C.B. MELHORAMENTO GENÉTICO DE PANINUM MAXIMUM. In: R.M.S. Resende et al., editors, melhoramento de forrageiras tropicais. EMBRAPA, Campo Grande, MS, Brazil. P. 55-87, 2008

JOY, E.J.M, ANDER, E.L., YOUNG, S.D. Dietary mineral supplies in Africa. *Physiologia Plantarum* 151: 208–229, 2014.

JOY, E.J.M., BROADLEY, M.R., YOUNG, S.D. Soil type influences crop mineral composition in Malawi. *Science of the Total Environment* 505:587–595, 2015.

LESSA, J.H.L., ARAÚJO, A.M., SILVA, G.N.T., GUILHERME, L.R.G., LOPES, G. Adsorption-desorption reactions of selenium (VI) in tropical cultivated and uncultivated soils under Cerrado bioma. *Chemosphere*, 164:271-277, 2016.

LI, H., MCGRATH, S. & ZHAO, F. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite. *New Phytol.*, 178:92-102, 2008.

LIU, X., DUAN, B., XIA, Q., JIAO, W., GUO, Z., HU, C., ZHAO, Z. Effects of sulfur on transformation of selenium in soil and uptake of selenium in rape. *Huanjingkeue Huanjingkexue* 35, 3564e3571, 2014.

- LOPES, G., ÁVILA, F.W., GUILHERME, L.R.G. Selenium behavior in the soil environment and its implication for human health. *Ciência e Agrotecnologia*, 41(6):605-615, 2017.
- MALAGOLI, M., SCHIAVON, M., DALL'ACQUA, S., & PILON-SMITS, E. A. Effects of selenium biofortification on crop nutritional quality. *Frontiers in Plant Science*, 6, 280, 2015.
- MALAVOLTA, E. 1981. Manual de química agrícola: adubos e adubação. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 594 p.
- MALIK, J.A., GOEL, S., KAUR, N., SHARMA, S., SINGH, I., NAYYAR, H. Selenium antagonises the toxic effects of arsenic on mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) plants by restricting its uptake and enhancing the antioxidative and detoxification mechanisms. *Environ. Exp. Bot.* 77, 242-248, 2012.
- MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Instrução Normativa Nº 46, regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, registro de produto, autorizações, embalagem, rotulagem, documentos fiscais, propaganda e tolerâncias dos fertilizantes minerais destinados à agricultura. 2016.
- MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano nacional para o desenvolvimento da cadeia produtiva do feijão e pulses. 2018.
- MARSCHALL, T.A., BORNHORST, J., KUEHNELT, D., SCHWERDTLE, T. Differing cytotoxicity and bioavailability of selenite, methylselenocysteine, selenomethionine, selenosugar and trimethylselenonium ion and their underlying metabolic transformations in human cells. *Mol. Nutr. Food Res.* 60, 2622-2632, 2016.
- MATOS, R.P., LIMA, V.M., WINDMEOLLER, C.C., NASCENTES, C.C. Correlation between the natural levels of selenium and soil physicochemical characteristics from the Jequitinhonha Valley (MG), Brazil. *J. Geochem. Explor.* 172, 195-202, 2017.
- MAYLAND, H., GOUGH, L., STEWART, K. Chapter E: Selenium Mobility in Soils and its Absorption, Translocation, and Metabolism in Plants. 1991.
- MORA, M. L., DURÁN, P., ACUÑA, A. J., CARTES, P., DEMANET, R., GIANFREDA, L. Improving selenium status in plant nutrition and quality. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2), 486-503, 2015.
- MORAES, M.F.; WELCH, R.M.; NUTTI, M.R.; CARVALHO, J.L.V.; WATANABE, E. Evidences of selenium deficiency in Brazil: from soil to human nutrition. In: BANUELOS, G.R.; LIN, Z.G.; YIN, X.B. (Eds). *First International Conference on Selenium in the Environment and Human Health, 2009, Suzhou. Selenium: deficiency, toxicity and biofortification for human health.* 116p. Hefei: University of Science and Technology of China Press, p.73-74. 2009.
- MORAES, M. F. Relação entre nutrientes de plantas, qualidade de produtos agrícolas e saúde humana. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 123, p. 21-23, set. 2008.
- MORENO M.J.R., CALA, V.R., JIMENEZ, R.B. Selenium distribution in topsoils and plants of a semi-arid Mediterranean environment. *Environmental Geochemistry and Health* 27: 513-519, 2005.

MOSHER, B.W., DUCE, R.A. A global atmospheric selenium budget. *J. Geophys. Res.: Atmospheres* 92, 13289e13298, 1987.

MOUTA, E.R., MELO, W.J., SOARES, M.R., ALLEONI, L.R.F., CASAGRANDE, J.C. Adsorção de selênio em Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:1033-1041, 2008.

NAZ, F.S., YUSUF, M., KHAN, T.A., FARIDUDDIN, Q., AHMAD, A. Low level of selenium increases the efficacy of 24-epibrassinolide through altered physiological and biochemical traits of *Brassica juncea* plants. *Food Chem.* 185, 441e448, 2015.

NEAL, R.H. Selenium. In: ALLOWAY, B.J. *Heavy metals in soils*. 2.ed. New York: Wiley. p.260-283. 1995.

NOTHSTEIN, A.K., EICHE, E., RIEMANN, M., NICK, P., WINKEL, H.E.L. Tracking Se assimilation and speciation through the Rice plant - nutrient competition, toxicity and distribution. *PLoS One* 11, 2016.

PAIVA NETO, J.E. GARGANTINI, H. Dosagem de selênio no solo. *Bragantia* 15, 13-16. 1956.

PANDEY, C., GUPTA, M. Selenium and auxin mitigates arsenic stress in Rice (*Oryza sativa* L.) by combining the role of stress indicators, modulators and genotoxicity assay. *J. Hazard Mater.* 287, 384e391, 2015.

PREMARATHNA, L., MCLAUGHLIN, M.J., KIRBY, J.K., HETTIARACHCHI, G.M., STACEY, S., CHITTLEBOROUGH, D.J. Selentae-enriched urea granules are a highly effective fertilizer for selenium biofortification of paddy rice grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 60, 6037 – 6044, 2012.

PENG, Q., WANG, M., CUI, Z., HUANG, J., CHEN, C., GUO, L., LIANG, D. Assessment of bioavailability of selenium in different plant-soil systems by diffusive gradients in thin-films (DGT). *Environ. Pollut.* 225, 637e643, 2017.

PILBEAM, D.J., GREATHEAD, H.M.R., DRIHEM, K. Selenium. In: A.V. Barker, D.J. Pilbeam, eds. *A handbook of plant nutrition*, 2nd edn. Boca Raton, FL: CRC Press, 165–198, 2015.

PILON-SMITS, E.A., QUINN, C.F., TAPKEN, W., MALAGOLI, M., SCHIAVON, M. Physiological functions of beneficial elements. *Curr. Opin. Plant Biol.* 12, 267–274, 2009..

PUSCHENREITER, M., 2009. In: Prasad, M.N.V. (Ed.), *Trace Elements as Contaminants and Nutrients: Consequences in Ecosystems and Human Health*. Wiley Online Library.

RAMOS, S. J., FRANQUIN, V., ALMEIDA, H. J., ÁVILA, F. W., GUILHERME, L. R. G., BASTOS, C. E. A., ÁVILA, P. A. Selenato e selenito na produção, nutrição mineral e biofortificação com selênio em cultivares de alface. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 4, p. 1347-1355, 2011.

RAYMAN, M.P. The argument for increasing selenium intake. *Proceedings of the Nutrition Society*, London, v. 61, n. 2, p. 203-215, 2002.

ROSENFELD, I., BEATH, O.A. Selenium: Geobotany, Biochemistry, Toxicity, and Nutrition. Academic Press. 2013.

SAMMÁN, N., MALDONADO, S., ALFARO, M.E., FARFAN, N., GUTIERREZ, J. Composition of different bean varieties (*Phaseolus vulgaris*) of northwestern Argentina (region NOA): cultivation zone influence. *Journal Agricultural and Food Chemistry*, v. 47, p. 2685-2689, 1999.

SORS, T.G., ELLIS, D.R., SALT, D.E. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants. *Photosynth. Res.*, 86:373-389, 2005.

SOUZA, G. A., DE CARVALHO, J. G., RUTZKE, M., ALBRECHT, J. C., GUILHERME, L. R., LI, L. Evaluation of germplasm effect on Fe, Zn and Se content in wheat seedlings. *Plant Science*, 210, 206-213, 2013.

SOUZA, M.P. Rate- Limiting Steps in Selenium Assimilation and Volatilization by Indian Mustard, *Plant Physiology*, v. 117, p. 1487-1494, 1998.

SGARBIERI, V.C. Estudo do conteúdo e de algumas características das proteínas e sementes de plantas leguminosas. *Ciência e Cultura*, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 78-84, jan./fev. 1980.

SGARBIERI, V.C., WHITAKER, J.R. Physical, chemical and nutritional properties of common beans (*Phaseolus*) proteins. *Advances Food Research*, v. 28, n. 3, p. 93-166, 1982.

STOFFANELLER, R., MORSE, N.L. A review of dietary selenium intake and selenium status in Europe and the Middle East. *Nutrients*, 1494e1537, 2015.

STROUD, J., BROADLEY, M., FOOT, I., FAIRWEATHER-TAIT, S., HART, D., HURST, R., KNOTT, P., MOWAT, H., NORMAN, K., SCOTT, P. Soil factors affecting selenium concentration in wheat grain and the fate and speciation of Se fertilisers applied to soil. *Plant Soil* 332, 19e30, 2010.

TORRES, F.E., SILVA-FILHO, N.M., TEODORO, P.E. Crescimento e produção de forragem de cultivares de *Panicum maximum* em função do tipo de semente. *Global Science and Technology*, Rio Verde, v.08, n.01, p.40, 2015.

THIRY, C., RUTTENS, A., DE TEMMERMAN, L., SCHNEIDER, Y.-J., PUSSEMIER, L. Current knowledge in species-related bioavailability of selenium in food. *Food Chem.* 130, 767e784, 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. Microwave assisted acid digestion of sediments sludge, soils, and oils. EPA SW 846 3051a, p. 30, 2007.

USGS. United States Geological Survey. Selenium and Tellurium Statistics and Information, 2017.

VAN HOEWYK, D. A tale of two toxicities: malformed selenoproteins and oxidative stress both contribute to selenium stress in plants. *Ann. Bot.* 112, 965e967, 2013.

VOCK, M. G.. Volatile loss of ammonia following surface application of urea to turf or bare soils. *Agron. J.* 51: 746-749, 1959.

WANG, J., LI, H., LI, Y., YU, J., YANG, L., FENG, F., CHEN, Z. Speciation, distribution, and bioavailability of soil selenium in the Tibetan Plateau Kashin-beck disease area: a case study in Songpan County, Sichuan Province, China. *Biol. Trace Elem. Res.* 156, 367-375, 2013.

WANG, Z., GAO, Y. Biogeochemical cycling of selenium in Chinese environments. *Appl. Geochem.* 16, 1345-1351, 2001.

XING, K., ZHOU, S., WU, X., ZHU, Y., KONG, J., SHAO, T., TAO, X. Concentrations and characteristics of selenium in soil samples from Dashan Region, a selenium-enriched area in China. *Soil Sci. Plant Nutr.* 61, 889-897, 2015.

ZHAO, F. J., & McGRATH, S. P. Biofortification and phytoremediation. *Current Opinion in Plant Biology*, 12(3), 373-380, 2009.

ANEXOS

Tabela 1. Resultado da análise de variância (quadrados médios) para parâmetros de produção do feijoeiro.

FV	Quadrado médio		
	vagens/vaso	grãos/vaso	grãos/vagem
Método	7,584444 ^{ns}	375,333333 ^{ns}	0,063469 ^{ns}
Dose	12,261111 ^{ns}	1075,594444 ^{ns}	0,798640 ^{ns}
Método*Dose	8,601111 ^{ns}	306,194444 ^{ns}	0,167925 ^{ns}
Bloco	216,077778 ^{**}	4386,033333 [*]	0,051870 ^{ns}
Média	47,65	230,60	4,84
CV (%)	7,80	10,75	8,73

FV: Fontes de variação; * significativo a 5 % de probabilidade; ns: não significativo para o teste F.

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 2. Resultado da análise de variância (quadrados médios), para parâmetros de produção de massa seca de cada estrutura da planta de feijão e capim.

FV	Quadrado médio			
	Caule	Folha	Vagem	Grão
	-----kg/vaso-----			
Método	0,000006 ^{ns}	0,000007 ^{ns}	0,000001 ^{ns}	0,000013 ^{ns}
Dose	0,000003 ^{ns}	0,000056 ^{ns}	0,000005 ^{ns}	0,000031 ^{ns}
Método*Dose	0,000001 ^{ns}	0,000009 ^{ns}	0,000001 ^{ns}	0,000010 ^{ns}
Bloco	0,000034 ^{**}	0,000336 ^{**}	0,000018 ^{**}	0,000067 [*]
Média	0,015	0,024	0,021	0,049
CV (%)	8,65	18,39	5,96	6,93

FV = fontes de variação; CV: coeficiente de variação; * e ** significativo a 1 e 5 % de probabilidade e ns: não significativo pelo teste F.

Fonte: Do autor (2020).

Tabela 3. Equações de regressão linear em função das doses de Se aplicadas para cada método avaliado, para caule, folha, vagem e grão.

Caule			
Método	Equação de Regressão	R² (%)	P
MAP-Se	$y = 2,492x + 0,450$	54,4	p<0,01
Ureia-Se	$y = 3,620x + 0,843$	83,4	p<0,01
Foliar-Se	$y = 3,106x + 0,885$	73,5	p<0,01
MAP-Se + Ureia-Se	$y = 1,978x + 0,527$	90,8	p<0,01
MAP-Se + Foliar-Se	$y = 2,319x + 0,598$	86,6	p<0,01
Ureia-Se + Foliar-Se	$y = 3,226x + 0,618$	82,0	p<0,01
Folha			
Método	Equação de Regressão	R² (%)	P
MAP-Se	$y = 5,629x + 1,038$	72,8	p<0,01
Ureia-Se	$y = 3,823x + 2,030$	32,1	p<0,01
Foliar-Se	$y = 6,197x + 1,936$	90,4	p<0,01
MAP-Se + Ureia-Se	$y = 4,390x + 1,004$	64,9	p<0,01
MAP-Se + Foliar-Se	$y = 5,210x + 2,822$	67,3	p<0,01
Ureia-Se + Foliar-Se	$y = 5,405x + 2,408$	81,0	p<0,01
Vagem			
Método	Equação de Regressão	R² (%)	P
MAP-Se	$y = 1,184x + 0,200$	67,1	p<0,01
Ureia-Se	$y = 4,176x - 0,211$	79,6	p<0,01
Foliar-Se	$y = 2,049x + 0,243$	92,5	p<0,01
MAP-Se + Ureia-Se	$y = 2,914x - 0,056$	90,6	p<0,01
MAP-Se + Foliar-Se	$y = 1,815x + 0,025$	89,7	p<0,01
Ureia-Se + Foliar-Se	$y = 2,204x + 0,219$	91,7	p<0,01
Grão			
Método	Equação de regressão	R² (%)	P
MAP-Se	$y = 3,557x - 0,255$	78,5	p<0,01
Ureia-Se	$y = 4,783x + 0,293$	76,3	p<0,01
Foliar-Se	$y = 5,957x - 0,272$	86,9	p<0,01
MAP-Se + Ureia-Se	$y = 7,515x - 0,811$	88,8	p<0,01
MAP-Se + Foliar-Se	$y = 4,534x - 0,343$	95,7	p<0,01
Ureia-Se + Foliar-Se	$y = 6,733x - 0,151$	93,8	p<0,01

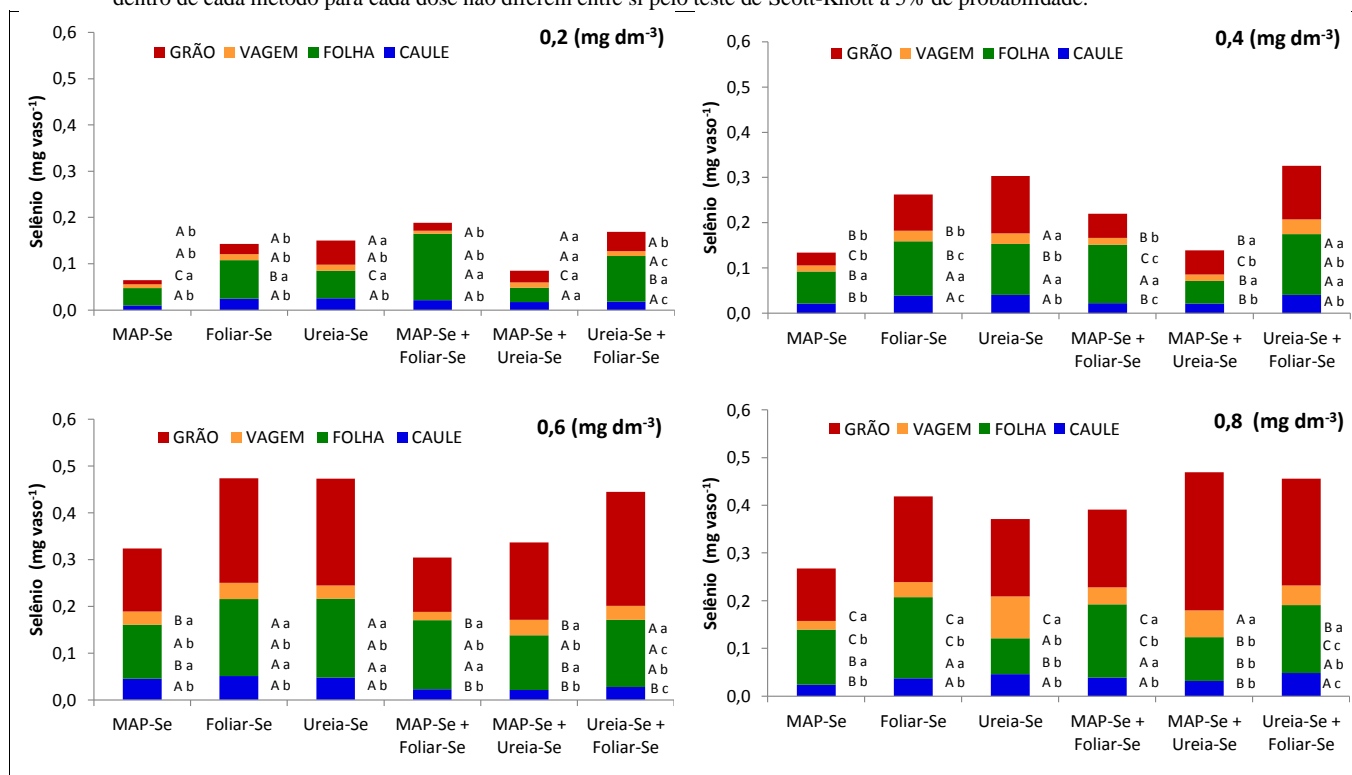
Fonte: Do autor (2020).

Tabela 4. Resultado da análise de variância (quadrados médios), para parâmetros de produção de massa seca da planta de capim.

FV	Quadrado médio
	Capim
	-----kg/vaso-----
Método	0,000010 ^{ns}
Dose	0,000011 ^{ns}
Método*Dose	0,000010 ^{ns}
Bloco	0,000083*
Média	0,022
CV (%)	15,79

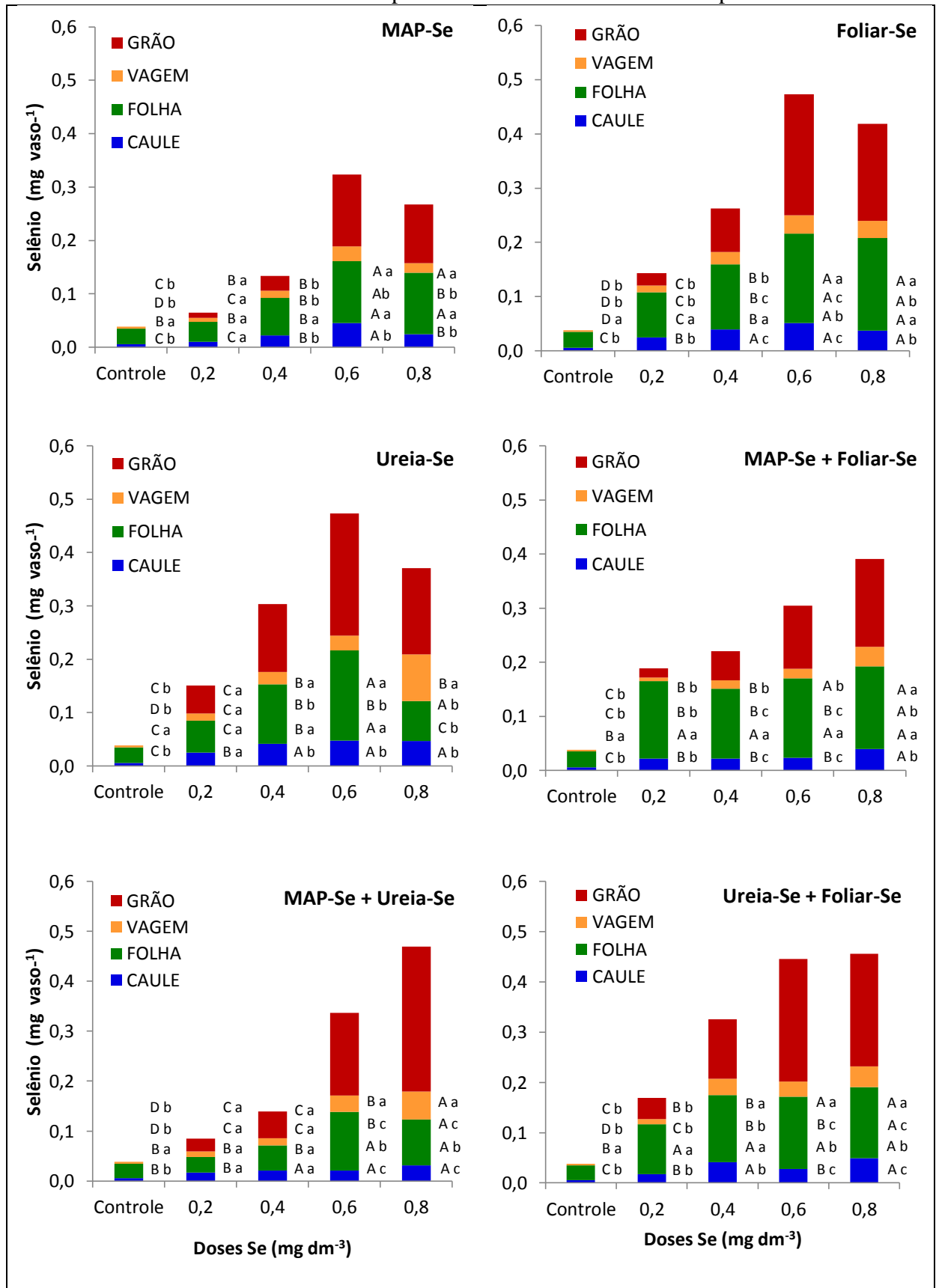
FV = fontes de variação; CV: coeficiente de variação; * e ** significativo a 1 e 5 % de probabilidade e ns: não significativo pelo teste F. Fonte: Do autor (2020).

Figura 1. Acúmulo de Se em mg vaso^{-1} na parte aérea do feijoeiro. Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre os métodos e minúscula dentro de cada método para cada dose não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.



Fonte: Do autor (2020).

Figura 2. Acúmulo de Se em mg vaso^{-1} na parte aérea do feijoeiro. Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre as doses e minúscula dentro de cada dose para cada método não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.



Fonte: Do autor (2020).