

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
- CAMPUS BAMBUÍ
BACHARELADO EM
AGRONOMIA

BRENO DIAS LIMA

**APLICAÇÃO DE COQUETEL DE ZINCO, SELÊNIO E IODO, UTILIZADOS
NA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA, E SEUS EFEITOS SOBRE A
PRODUTIVIDADE DO FEIJÃO COMUM (*Phaseolus vulgaris* L.)**

BAMBUÍ-MG

2026

BRENO DIAS LIMA

**APLICAÇÃO DE COQUETEL DE ZINCO, SELÊNIO E IODO, UTILIZADOS
NA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA, E SEUS EFEITOS SOBRE A
PRODUTIVIDADE DO FEIJÃO COMUM (*Phaseolus vulgaris* L.)**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso Bacharelado em
Agronomia do Instituto Federal de
Minas Gerais - Campus Bambuí para
obtenção do grau de bacharel em
Agronomia.

Orientadora: Dra. Ana Cardoso
Clemente Filha Ferreira de Paula

Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - Campus Bambuí

L732a Lima, Breno Dias.

Aplicação de coquetel de zinco, selênio e iodo, utilizados na biofortificação agrônômica, e seus efeitos sobre a produtividade do feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) / Breno Dias Lima. – 2026.
40 f. : il. ; color.

Orientadora: Ana Cardoso Clemente Filha Ferreira de Paula.
Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) –
Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Bambuí*.

1. Biofortificação. 2. Produtividade. 3. *Phaseolus vulgaris* L. I.
Paula, Ana Cardoso Clemente Filha Ferreira de. II. Instituto Federal de
Minas Gerais – *Campus Bambuí*. III. Título.

CDD 635.652

Catálogo: João Batista Rodrigues - CRB-6/2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS

Campus Bambuí
Diretoria de Ensino
Departamento de Ciências Agrárias
Faz. Varginha - Rodovia Bambuí/Medeiros - Km 05 - Caixa Postal 05 - CEP 38900-000 - Bambuí - MG
37 3431 4900 - www.ifmg.edu.br

Breno Dias Lima

Aplicação de coquetel de zinco, selênio e iodo, utilizados na biofortificação agrônômica, e seus efeitos sobre a produtividade do feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Bambuí para obtenção do grau de bacharel em Agronomia.

Aprovado em 30/06/2026 pela banca examinadora:

Bambuí, 05 de julho de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Ana Cardoso Clemente Filha Ferreira de Paula, Professora**, em 13/07/2026, às 23:51, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Gislaine Pacheco Tormen, Professora**, em 14/07/2026, às 08:48, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Manoel de Oliveira, Professor**, em 14/07/2026, às 17:14, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2795641** e o código CRC **B260D3A3**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, por nunca me desamparar durante toda essa trajetória e por me guiar em cada passo dado até aqui. Sem Sua força, nada seria possível, a Ele toda honra e toda glória. Deus pai todo poderoso, sou eternamente grato por sempre auxiliar e conduzir minha vida.

Agradeço aos meus pais, Elcio e Rosiclei; meus irmãos, Kleber, Eric e Isabela; minha namorada Isadora; meus tios, Donizetti e Neusa, por sempre acreditarem em mim e me apoiarem em toda caminhada acadêmica. Nesse caminho, vocês foram peças chaves para realização desse sonho, nosso sonho.

Agradeço à minha orientadora, Ana Cardoso, ao meu coorientador, Konrad, ao pesquisador Fábio Aurélio e a toda equipe técnica do campus e da EPAMIG envolvidos no desenvolvimento do trabalho. O apoio de vocês foi base para a execução do projeto.

Agradeço a todos os meus amigos que não mediram esforços para me ajudar, que estiveram comigo em todos os momentos durante esse percurso, em especial ao Fabrício, Cauã, Artur, Gabriel Nazareth, Vinícius, Gabriel Ribeiro, Paulo, Maria Antônia, Eduarda, Camila e Naiara.

Agradeço também, em especial, a todos os professores, por toda atenção e apoio durante a trajetória acadêmica. Levarei seus conhecimentos e conselhos por onde for.

“Não há crescimento sem desconforto”
Carl Jung

RESUMO

LIMA, Breno Dias. **Aplicação de coquetel de zinco, selênio e iodo, utilizados na biofortificação agronômica, e seus efeitos sobre a produtividade do feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.).** 2026. 44 p. Monografia (Bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal de Minas Gerais, Bambuí, 2026.

A biofortificação agronômica tem se destacado como uma estratégia promissora para aumentar a concentração de micronutrientes em alimentos de amplo consumo, contribuindo para a segurança alimentar e nutricional da população. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação foliar de um coquetel contendo zinco (Zn), selênio (Se) e iodo (I) sobre a produtividade e a classificação de grãos de diferentes genótipos de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.). O experimento foi conduzido no Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Bambuí, em delineamento de blocos casualizados, com três repetições, em esquema de parcelas subdivididas, envolvendo onze genótipos e dois tratamentos, com e sem aplicação do coquetel biofortificante. Foram avaliadas a produtividade de grãos e a proporção de grãos retidos em diferentes peneiras. Os resultados demonstraram interação significativa entre os genótipos e a aplicação do coquetel. Houve incremento de produtividade nos genótipos BRSMG Majestoso, BRSMG Amuleto e BRSMG União, evidenciando respostas diferenciadas à biofortificação. Em relação à classificação dos grãos, observou-se predominância de grãos retidos na peneira acima de 12 mm, com alterações na distribuição entre peneiras dependendo do genótipo avaliado. Os resultados indicam que a eficiência da biofortificação agronômica com zinco, selênio e iodo é dependente do material genético utilizado, podendo contribuir para o aumento da produtividade e para a melhoria da qualidade comercial dos grãos de feijão.

Palavras-chave: Biofortificação; Produtividade; *Phaseolus vulgaris* L.

ABSTRACT

LIMA, Breno Dias. **Application of a zinc, selenium, and iodine cocktail used in agronomic biofortification and its effects on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) productivity.** 2026. 44 p. Monografia (Bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal de Minas Gerais, Bambuí, 2026.

Agronomic biofortification has emerged as a promising strategy to increase micronutrient concentrations in widely consumed foods, thereby contributing to the population's food and nutritional security. In this context, this study aimed to evaluate the effect of the foliar application of a cocktail containing zinc (Zn), selenium (Se), and iodine (I) on the yield and grain classification of different common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. The experiment was conducted at the Federal Institute of Minas Gerais – Bambuí Campus using a randomized complete block design with three replications in a split-plot arrangement, involving eleven genotypes and two treatments: with and without the application of the biofortifying cocktail. Grain yield and the proportion of grains retained on different sieves were evaluated. The results showed a significant interaction between genotypes and the cocktail application. Yield increases were observed in the BRSMG Majestoso, BRSMG Amuleto, and BRSMG União genotypes, highlighting differential responses to biofortification. Regarding grain classification, a predominance of grains retained on sieves larger than 12 mm was observed, with variations in distribution across sieves depending on the genotype evaluated. The results indicate that the efficiency of agronomic biofortification with zinc, selenium, and iodine depends on the genetic material used and can contribute to increased yield and improved commercial quality of common bean grains.

Keywords: Biofortification; Productivity; *Phaseolus vulgaris* L.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1** – Localização da área de estudo localizada no IFMG Campus Bambuí..... 24
- Figura 2** – Preparo da área e distribuição dos tratamentos na área experimental25
- Figura 3** – Croqui de distribuição dos tratamentos27
- Figura 4** – Produtividade de grãos de diferentes genótipos de feijoeiro submetidos à aplicação ou não de coquetel contendo zinco, selênio e iodo. Letras maiúsculas comparam a aplicação do coquetel dentro de cada genótipo, enquanto letras minúsculas comparam os genótipos dentro de cada condição de aplicação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam a média $\pm$ erro –padrão ($n = 3$).....29
- Figura 5** – Proporção de grãos na peneira acima de 12 mm para o feijoeiro, de acordo com o uso de diferentes genótipos submetidos ou não à aplicação de um coquetel contendo zinco, selênio e iodo. Barras seguidas da mesma letra maiúscula não indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) entre a aplicação ou não do coquetel em cada genótipo avaliado. Barras seguidas da mesma letra minúscula não indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) entre os diferentes genótipos em cada condição de aplicação do coquetel. Barras representam a média de cada tratamento, seguidas do erro associado ($n = 3$) 31
- Figura 6** – Proporção de grãos na peneira mediana do feijoeiro, de acordo com o uso de diferentes genótipos submetidos ou não à aplicação de um coquetel contendo zinco, selênio e iodo. Barras seguidas da mesma letra maiúscula não indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) entre a aplicação ou não do coquetel em cada genótipo avaliado. Barras seguidas da mesma letra minúscula não indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) entre os diferentes genótipos em cada condição de aplicação do coquetel. Barras representam a média de cada tratamento, seguidas do erro associado ($n = 3$)..... 33
- Figura 7** – Proporção de grãos no fundo da peneira para o feijoeiro, de acordo com o uso de diferentes genótipos submetidos ou não à aplicação de um coquetel contendo zinco, selênio e iodo. Barras seguidas da mesma letra maiúscula não indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) entre a aplicação ou não do coquetel em cada

genótipo avaliado. Barras seguidas da mesma letra minúscula não indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) entre os diferentes genótipos em cada condição de aplicação do coquetel. Barras representam a média de cada tratamento, seguidas do erro associado ($n = 3$)..... 34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO GERAL	12
2.1. Objetivos Específicos.....	12
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1. Cultura do feijão	12
3.2. O melhoramento genético do feijoeiro.....	13
3.3. Grupo Carioca	15
3.3.1. BRSMG Uai	15
3.3.2. BRSMG Majestoso	15
3.3.3. BRS FC409.....	15
3.3.4. BRSMG Amuleto.....	15
3.4. Grupo Vermelho	16
3.4.1. BRSMG Marte.....	16
3.4.2. Ouro Vermelho	16
3.5. Grupo Rajado.....	16
3.5.1. BRSMG Realce	16
3.6. Grupo Jalo	17
3.6.1. BRSMG União.....	17
3.7. Grupo Preto	17
3.7.1. Ouro Negro.....	17
3.8. Grupo Roxo	17
3.8.1. BRSMG Tesouro	17
3.9. Grupo Especial	18
3.9.1. BRSMG Zape	18
3.10. Biofortificação	18
3.10.1. Zinco	19
3.10.2. Selênio.....	20
3.10.3. Iodo	21
3.11. Interação Selênio e Iodo.....	21
4. MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1. Área experimental e condução do experimento.....	23
4.2. Delineamento Experimental	26
4.3. Colheita e análise dos dados.....	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
6. CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

A segurança alimentar no Brasil continua sendo um desafio, principalmente em regiões com maior vulnerabilidade social e econômica, onde o consumo diário de elementos essenciais ainda é insuficiente (Santos, 2021). A biofortificação agronômica surge como uma alternativa eficiente para combater a “fome oculta”, permitindo o enriquecimento dos alimentos cultivados com nutrientes como zinco (Zn), selênio (Se) e iodo (I), que são elementos frequentemente carentes na dieta de populações de baixa renda (Galić *et al.*, 2021). A biofortificação agronômica consiste na aplicação de um elemento alvo durante o ciclo de desenvolvimento de uma cultura, de tal modo que, a partir dessa aplicação, o elemento alvo possa ser acumulado em sua parte comestível (Galić *et al.*, 2021).

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), principal leguminosa consumida no Brasil, é um excelente candidato para programas de biofortificação, pois seus grãos são fonte significativa de proteínas, fibras, vitaminas e minerais (Cabraia *et al.*, 2019). Estudos agronômicos demonstram que a aplicação de zinco, via solo e foliar, aumentaram os teores deste micronutriente nos grãos, sem prejuízos à produtividade (Vidigal, 2020). Além disso, estudos apontam que a associação de zinco com ácido cítrico mostrou-se promissora, com ganhos superiores aos de sua aplicação isolada visando o enriquecimento nutricional do feijoeiro (Figueiredo, 2025).

Embora diferentes pesquisas tenham abordado a biofortificação com zinco, há uma carência de estudos no uso simultâneo de selênio e iodo para enriquecer o feijão-comum, apesar da relevância conjunta desses nutrientes para o desenvolvimento humano, e agregação de valor ao produto. Apesar dos elementos selênio e iodo não serem essenciais às plantas, são considerados benéficos, podendo acumulá-los em suas partes comestíveis (White e Broadley, 2009). A biofortificação com selênio também tem evidências favoráveis, especialmente em culturas parecidas, como milho e arroz, reforçando a viabilidade dessa abordagem para novas aplicações (Galić *et al.*, 2021).

Na biofortificação agronômica, um aspecto crucial é o aumento dos teores nas partes comestíveis sem redução da produtividade das culturas, pois uma vez em excesso, elementos como zinco, selênio e iodo podem ser tóxicos às plantas (Galić *et al.*, 2021). Aliado a isso, espera-se que diferentes cultivares de feijoeiro possam ter respostas diferentes às mesmas concentrações aplicadas de zinco, selênio e iodo devido a diferentes capacidades de metabolizar e acumular esses

elementos (Figueiredo *et al.*, 2017). Vale ressaltar que o feijão-caupi, que apresenta genética próxima ao feijão-comum, também apresentou aumento no conteúdo de zinco e ferro após a aplicação agrônômica desses micronutrientes (Embrapa, 2015). Esses resultados reforçam a hipótese de que estratégias semelhantes podem ser eficazes no feijão-comum, como a utilização da biofortificação.

2. OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo avaliar parâmetros agrônômicos de diferentes cultivares de feijão submetido a adubação foliar de zinco, selênio e iodo em diferentes fases de desenvolvimento da cultura, com foco em promover a biofortificação agrônômica do feijoeiro e avaliar o efeito desta na produtividade.

2.1. Objetivos Específicos

- Determinar se a adubação foliar complementar com zinco, selênio e iodo influencia na produtividade e proporção do feijoeiro retido em diferentes peneiras.
- Verificar como diferentes cultivares de feijão respondem a aplicação foliar de zinco, selênio e iodo.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Cultura do feijão

Dentro das *Fabaceae*, o feijão-comum (*Phaseolus vulgaris L.*), é o alimento com fonte de proteína vegetal mais importante na dieta da população brasileira, pois está presente na mesa de toda diversidade de classes de renda do país, encaixando-se em pratos típicos culturais, agradáveis e acessíveis, quando comparado com dietas à base de proteína animal. Trata-se de um alimento base na alimentação humana e que tem assumido um papel crucial na segurança alimentar. Estudos apontam que 71,9% das pessoas com idade acima de 18 anos consomem feijão regularmente, sendo as mulheres apresentando consumo inferior ao dos homens, nas respectivas proporções de 67,6%

e 76,8% (Carbonell; Chiorato; Bezerra, 2021, p. 110).

Atualmente, o feijão é considerado um alimento funcional devido aos seus vários benefícios à saúde humana, que são notáveis na prevenção e tratamento de doenças crônicas. Dessa forma, ele se tornou um dos mais importantes componentes das dietas segmentadas da população, junto ao arroz, que forma a combinação mais utilizada no país, podendo ser adaptado às mais diversas formas de consumo, considerando as inúmeras maneiras de condução de uma dieta, sendo configurado como tendência alimentar no Brasil e no mundo. Tornando-se referência alimentar, traz um ambiente de novas oportunidades de negócios, de conceitos em produtos e serviços, e, principalmente, nas inovações junto à cadeia de produção da cultura (Carbonell; Chiorato; Bezerra, 2021, p. 110).

O feijão é cultivado em grande parte de toda a extensão territorial brasileira, principalmente por pequenos e médios produtores, os quais têm papel importantíssimo para a manutenção da economia regional. Destacando nos aspectos econômicos e sociais, e, da mesma forma, sofrendo com as oscilações de preços, um levantamento realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), em setembro de 2025, mostra que a perspectiva de produção é de 4.199 kg por hectare, representando uma redução de 2% quando comparado a safra 24/25. Além disso, vale destacar que a maior parte da produção brasileira fica para consumo interno do país, frisando ainda mais a relevância de se trabalhar agronomicamente com a segurança alimentar.

3.2. O melhoramento genético do feijoeiro

O melhoramento genético do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) tem desempenhado papel fundamental no aumento da produtividade, na estabilidade produtiva e na adaptação da cultura às diferentes condições edafoclimáticas brasileiras. No Brasil, programas de melhoramento conduzidos principalmente pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), instituições estaduais de pesquisa e universidades têm contribuído significativamente para o desenvolvimento de cultivares mais produtivas, resistentes a doenças e adaptadas às exigências do mercado consumidor.

Historicamente, o melhoramento do feijoeiro esteve voltado principalmente ao aumento da produtividade de grãos. Entretanto, nas últimas décadas, os programas passaram a incorporar características relacionadas à qualidade tecnológica dos grãos, resistência a patógenos, tolerância

a estresses abióticos e eficiência no uso de nutrientes, buscando maior estabilidade produtiva e sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Faria *et al.*, 2013).

De acordo com Faria *et al.* (2013), os programas de melhoramento genético do feijoeiro do grupo comercial carioca no Brasil promoveram ganhos genéticos significativos ao longo de mais de duas décadas de seleção, especialmente para produtividade de grãos, arquitetura de plantas e adaptação ambiental. Esses avanços foram possíveis devido à utilização de métodos de seleção mais eficientes, à avaliação de genótipos em múltiplos ambientes e à incorporação de características agronômicas de interesse econômico.

Além disso, o uso de ferramentas biotecnológicas e de marcadores moleculares tem contribuído para acelerar os processos de seleção e aumentar a eficiência do melhoramento genético. Segundo Pereira *et al.* (2008), a seleção assistida por marcadores moleculares possibilita identificar genótipos superiores ainda nas fases iniciais de desenvolvimento, favorecendo ganhos genéticos mais rápidos e precisos.

Outro aspecto importante do melhoramento do feijoeiro é a busca por cultivares com maior adaptabilidade e estabilidade produtiva. Nesse contexto, estudos envolvendo interação entre genótipo e ambiente têm sido fundamentais para a recomendação de materiais mais estáveis e responsivos às diferentes condições de cultivo encontradas no Brasil (Melo *et al.* 2021).

Atualmente, o melhoramento genético do feijoeiro também tem direcionado esforços para características relacionadas à biofortificação e à qualidade dos nutrientes dos grãos, visando contribuir para a segurança alimentar e nutricional da população. Dessa forma, o desenvolvimento de novas cultivares busca não apenas maiores rendimentos, mas também melhor qualidade fisiológica, nutricional e comercial dos grãos. A cultivar BRSMG Uai pertence ao grupo comercial carioca e apresenta hábito de crescimento indeterminado (Tipo II), com arquitetura de planta ereta, o que favorece a colheita mecânica direta e reduz perdas por contato das vagens com o solo; possui ciclo médio entre 85 e 95 dias, variando conforme a região e a época de semeadura; e apresenta grãos com massa média de cem sementes em torno de 24 g e elevado potencial produtivo, superando cultivares tradicionais como Pérola em ensaios de valor de cultivo e uso. É indicada para cultivo em Minas Gerais, Goiás, Distrito Federal, Espírito Santo, Rio de Janeiro, Bahia, Maranhão e Tocantins (Embrapa, 2018).

3.3. Grupo Carioca

3.3.1. BRSMG Uai

A cultivar BRSMG Uai pertence ao grupo comercial carioca e apresenta hábito de crescimento indeterminado (Tipo II), com porte ereto e arquitetura de planta favorável à colheita mecanizada. Foi desenvolvida visando elevado potencial produtivo, estabilidade de rendimento e adaptação às condições de cultivo de Minas Gerais. Além disso, apresenta grãos com padrão comercial carioca de elevada aceitação pelo mercado consumidor e resistência ao vírus do mosaico-comum do feijoeiro, sendo recomendada para diferentes sistemas de produção (Embrapa, 2018).

3.3.2. BRSMG Majestoso

A cultivar BRSMG Majestoso é do grupo comercial carioca e apresenta hábito de crescimento indeterminado, com porte semiereto. Foi desenvolvida a partir do cruzamento entre as cultivares Pérola e Ouro Negro, visando elevada produtividade, qualidade de grão e resistência a doenças. Apresenta resistência ao vírus do mosaico-comum do feijoeiro e resistência moderada à antracnose, além de bom desempenho agrônômico em diferentes ambientes de cultivo, especialmente no estado de Minas Gerais (Abreu *et al.*, 2007; Embrapa, 2018).

3.3.3. BRS FC409

A cultivar BRS FC409 é do grupo comercial carioca, com hábito de crescimento indeterminado (Tipo II), porte ereto e ciclo médio de aproximadamente 86 dias. Apresenta massa de cem grãos próxima a 25 g e elevado potencial produtivo, podendo alcançar produtividades superiores a 3.700 kg ha⁻¹ em condições favoráveis. Destaca-se ainda pela boa qualidade tecnológica e nutricional dos grãos, com teores elevados de proteína, ferro e zinco, sendo indicada para diferentes regiões produtoras do Brasil (Embrapa, 2018).

3.3.4. BRSMG Amuleto

A cultivar BRSMG Amuleto foi desenvolvida para apresentar ampla adaptação e bom desempenho agrônomo em diferentes regiões do Brasil. Apresenta grãos com padrão comercial atrativo e potencial produtivo competitivo em ensaios conduzidos em Minas Gerais, Goiás, Paraná, Mato Grosso, Espírito Santo e Distrito Federal. É indicada para sistemas comerciais de produção que demandam estabilidade e qualidade de grãos (EPAMIG *et al.*, 2021).

3.4. Grupo Vermelho

3.4.1. BRSMG Marte

A cultivar BRSMG Marte caracteriza-se por apresentar grãos vermelhos brilhantes e plantas com arquitetura ereta, favorecendo a colheita mecanizada. Foi obtida a partir da linhagem SER 198 e apresenta bom desempenho produtivo em diferentes ambientes de cultivo. Possui resistência à mancha-angular e boa adaptação às condições edafoclimáticas do estado de Minas Gerais, sendo indicada para cultivo em regiões produtoras que demandam cultivares diferenciadas quanto à coloração do grão (EPAMIG *et al.*, 2021).

3.4.2. Ouro Vermelho

A cultivar Ouro Vermelho pertence ao grupo comercial vermelho e apresenta ampla adaptabilidade e estabilidade produtiva. Foi desenvolvida no programa de melhoramento do feijoeiro para o estado de Minas Gerais, destacando-se por produtividade superior a cultivares tradicionais, além de maior tolerância à mancha-angular e ferrugem. Apresenta arquitetura de planta favorável ao manejo e boa aceitação comercial (Paula Júnior *et al.*, 1991).

3.5. Grupo Rajado

3.5.1. BRSMG Realce

A cultivar BRSMG Realce pertence ao grupo de feijões rajados e destaca-se pela alta qualidade visual e culinária dos grãos, associada a bom potencial produtivo. Apresenta plantas de porte ereto, adaptadas à colheita mecânica direta e resistência intermediária a importantes doenças

da cultura. A cultivar possui boa aceitação de mercado devido ao padrão diferenciado dos grãos e desempenho agrônômico satisfatório em diversas regiões produtoras (Melo *et al.*, 2011; Embrapa, 2018).

3.6. Grupo Jalo

3.6.1. BRSMG União

A cultivar BRSMG União pertence ao grupo comercial Jalo e apresenta ciclo precoce, com duração média de 77 dias. Possui grãos grandes, de coloração creme uniforme, com massa de cem grãos em torno de 39,6 g, além de excelente qualidade culinária. Apresenta resistência ao oídio e produtividade superior às cultivares testemunhas em ensaios de avaliação, sendo indicada para sistemas de produção que visam grãos tipo jalo de alto valor comercial (Embrapa, 2011).

3.7. Grupo Preto

3.7.1. Ouro Negro

A cultivar Ouro Negro pertence ao grupo comercial preto e é amplamente utilizada por produtores dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. Apresenta boa adaptação a sistemas de cultivo irrigado e de sequeiro, além de estabilidade produtiva e qualidade tecnológica dos grãos. É indicada tanto para cultivo solteiro quanto para sistemas consorciados, especialmente com milho (Paula Júnior *et al.*, 1991).

3.8. Grupo Roxo

3.8.1. BRSMG Tesouro

A cultivar BRSMG Tesouro pertence ao grupo comercial roxo e apresenta hábito de crescimento indeterminado (Tipo II), com porte semiereto. Possui ciclo médio de aproximadamente 86 dias e massa de cem grãos em torno de 19,9 g. Os grãos apresentam coloração roxa e brilho opaco. A cultivar destaca-se pela resistência à antracnose e bom desempenho produtivo no estado de Minas Gerais (Embrapa, 2018).

3.9. Grupo Especial

3.9.1. BRSMG Zape

A cultivar BRSMG Zape apresenta arquitetura de planta semiereta, ciclo médio de aproximadamente 90 dias e massa de cem grãos em torno de 26 g. Destaca-se pelo bom potencial produtivo, com médias superiores a 2.700 kg ha⁻¹ em ensaios experimentais, além de apresentar resistência à antracnose e bom padrão comercial de grãos. É indicada para sistemas de produção que demandam estabilidade produtiva e boa adaptação agronômica (EPAMIG, 2024).

3.10. Biofortificação

A biofortificação é uma estratégia inovadora e sustentável para o combate às deficiências de elementos essenciais para a população humana, sendo considerada uma forma de maior eficiência comparada à fortificação industrial e à suplementação. Trata-se do processo de aumentar a concentração de nutrientes nos alimentos, por meio do melhoramento genético, práticas agronômicas ou técnicas de biotecnologia. Essa abordagem é particularmente relevante em países em desenvolvimento, onde grande parte da população depende de alimentos básicos como feijão, arroz e mandioca, cuja composição nutricional muitas vezes não supre as necessidades diárias recomendadas (Biswas *et al.*, 2020).

No Brasil, a Rede BioFORT, coordenada pela Embrapa, tem realizado esforços para desenvolver cultivares biofortificados de feijão, arroz, milho, mandioca, batata-doce e abóbora. Esses alimentos vêm sendo melhorados principalmente para ferro, zinco e vitamina A, mas há também pesquisas em andamento com selênio e iodo. O feijão, em especial, é alvo prioritário dessas pesquisas, pois é consumido diariamente por diferentes classes sociais e tem alto valor cultural e nutricional na dieta brasileira, além de ser uma cultura que se adapta bem à indução de testes (Embrapa, 2021; UFLA, 2016).

No contexto da biofortificação agronômica, esta vem se tornando uma alternativa para mitigar as deficiências nutricionais que atingem a população e tem o objetivo de aumentar o acúmulo de nutrientes nos vegetais, podendo ser realizada com aplicações de fertilizantes diretamente no solo, via solução nutritiva ou pulverização foliar (Dias *et al.*, 2023). A

biofortificação com elementos como zinco, selênio e iodo pode ocorrer pela aplicação de fertilizantes ao solo, pulverizações foliares ou pelo uso de cultivares com maior capacidade de absorção e acúmulo. O zinco exerce funções vitais tanto no metabolismo vegetal quanto na saúde humana; já o selênio e iodo são essenciais para os humanos, mas têm efeito benéfico às plantas, justificando a integração de estudos que considerem simultaneamente as demandas nutricionais das plantas e a necessidade de suprir deficiências da população (Cambraia, 2019; Rora, 2020; Coelho, 2021).

3.10.1. Zinco

O zinco é um micronutriente que está inserido entre os 14 nutrientes minerais que as plantas necessitam para crescer e produzir com boa performance, sendo exigido em quantidades menores que outros elementos. A aplicação de fertilizantes à base de zinco no solo pode aumentar a concentração desse mineral nos grãos de feijão, melhorando a qualidade nutricional do alimento (Silva *et al.*, 2021). Por outro lado, com a deficiência ou o fornecimento em quantidades abaixo do ideal, as produções e os lucros tendem a diminuir, conseqüentemente, a utilização de outros nutrientes pela cultura, como o nitrogênio, por estarem diretamente associados em questão de absorção (Coelho *et al.*, 2021; Potafos, 1996).

Considerando aspectos diversos, as deficiências de zinco tendem a ocorrer nos períodos iniciais de desenvolvimento da cultura, quando os solos estão quentes e úmidos. Isso ocorre devido ao lento crescimento radicular, quando comparado ao rápido crescimento da plântula. Considerando esse lento crescimento das raízes, a parte aérea torna-se incapaz de absorver zinco na quantidade suficiente para suprir sua demanda nutricional específica. A maior parte do zinco disponível no solo está associado à matéria orgânica na superfície. Questões como o nivelamento do solo, o cultivo e a erosão podem vir a causar deficiência desse mineral nas culturas, principalmente em solos muito expostos que apresentam baixos teores de matéria orgânica, zinco nativo, ou com alto índice de pH (Potafos, 1996).

O zinco é um elemento essencial para o metabolismo vegetal e humano. Trabalhos realizados em diferentes regiões do Brasil avaliaram estratégias de adubação (aplicação no solo, parcelada e/ou pulverização foliar) para incrementar o teor de zinco em grãos de feijão. Resultados obtidos em diferentes estudos demonstram que a aplicação de zinco pode aumentar

significativamente sua concentração nos grãos de feijão, embora as respostas produtivas variem em função do genótipo, da dose aplicada, da forma de fornecimento e das condições de cultivo (Cambraia *et al.*, 2019; Vidigal, 2020).

3.10.2. Selênio

O selênio é um micronutriente para os seres humanos, atuando como componente de enzimas antioxidantes e na regulação da função tireoidiana. Sua deficiência pode resultar em comprometimento do sistema imunológico, infertilidade, maior suscetibilidade a doenças crônicas e problemas de crescimento. No Brasil, estudos têm mostrado grande variabilidade no teor de selênio em alimentos como a castanha-do-brasil, dependendo da região de cultivo, o que evidencia a importância de estratégias como a biofortificação para aumentar a oferta regular desse nutriente em alimentos básicos, como o feijão (Embrapa, 2016; Cunha *et al.*, 2020).

No campo, pesquisas demonstram que o feijão responde positivamente à aplicação de fontes de selênio via pulverização foliar. Rosa (2020), em estudo conduzido em Campo Alegre (GO), observou que a aplicação de selenato de sódio em doses adequadas elevou significativamente o teor de selênio nos grãos de feijão, embora doses elevadas tenham provocado sintomas de fitotoxicidade. Esses resultados reforçam a necessidade de ajustes finos no manejo da adubação, de modo a garantir benefícios nutricionais sem prejudicar o rendimento da cultura (Rosa, 2020).

Do ponto de vista agrônomo, as recomendações práticas derivadas dos estudos apontam para a necessidade de determinar limiares de resposta e de toxicidade específicos para cada cultivar e região; de optar, preferencialmente, por aplicações fracionadas; e monitorar a produtividade e a qualidade do grão paralelamente ao teor de selênio. A definição de práticas de manejo (fonte, dose por aplicação, número de aplicações e época) e a seleção de cultivares com maior capacidade de acumulação são elementos centrais para viabilizar a adoção por produtores, sem comprometer o rendimento (Melo *et al.*, 2021; Rosa, 2024).

Outros trabalhos confirmam que a biofortificação agrônoma com selênio não apenas eleva os teores no grão, mas também pode aumentar sua biodisponibilidade, permitindo que o consumo regular de feijão biofortificado contribua para a prevenção de deficiências nutricionais. Essa estratégia é especialmente promissora no Brasil, onde grande parte da população apresenta ingestão abaixo dos níveis recomendados de selênio (Corbo, 2014).

3.10.3. Iodo

O iodo é fundamental para a síntese dos hormônios tireoidianos (T3 e T4), essenciais para o crescimento, desenvolvimento neurológico e metabolismo energético. A deficiência desse elemento está associada a distúrbios como bócio endêmico, hipotireoidismo, atraso cognitivo e, em casos graves, cretinismo. No Brasil, a principal estratégia de prevenção é a iodação do sal de cozinha, regulamentada pela ANVISA, que estabelece a adição de 15 a 45 mg de iodo por kg de sal – considerando a quantidade consumida de 5 g de sal de cozinha e a média de 30 mg de iodo por kg de sal, equivaleria a uma quantidade fornecida por pessoa de $150 \mu\text{g}/\text{dia}^{-1}$, limite adequado de consumo. Apesar dessa política, estudos recentes apontam variações no estado nutricional da população, com prevalência tanto de deficiência quanto de excesso de iodo em determinadas regiões, o que pode trazer riscos adicionais à saúde pública (Medeiros-Neto *et al.*, 2009; Mayer, 2023).

Embora a biofortificação com iodo em feijão ainda seja incipiente, pesquisas realizadas com outras culturas, como alface e arroz, já demonstraram a viabilidade da aplicação agrônômica. Em experimentos com cultivo hidropônico de alface, por exemplo, observou-se que a adição de iodo na solução nutritiva elevou significativamente os teores do elemento nas folhas, confirmando que o mecanismo é viável e pode ser adaptado a leguminosas como o feijão (Coelho, 2021). A ausência de estudos específicos em feijão, no Brasil, revela uma lacuna científica que deve ser explorada, visto que a introdução desse elemento por meio da biofortificação poderia complementar de forma segura e eficaz a estratégia de iodação do sal (UFLA, 2016).

Portanto, a biofortificação com iodo em feijão representa uma fronteira promissora de pesquisa, com potencial de gerar impactos diretos na saúde pública, especialmente em regiões onde a ingestão de sal iodado é insuficiente ou irregular. Para isso, será necessário avaliar a resposta das cultivares de feijão, a biodisponibilidade do nutriente nos grãos e os possíveis efeitos sobre a produtividade e qualidade do alimento (Candido *et al.*, 2025).

3.11. Interação Selênio e Iodo

A interação entre selênio e iodo na biofortificação vegetal tem despertado crescente interesse científico devido ao potencial desses elementos na melhoria da qualidade nutricional dos

alimentos e no metabolismo das plantas. Estudos demonstram que o selênio pode contribuir para alterações fisiológicas relacionadas ao metabolismo antioxidante e ao acúmulo de nutrientes em plantas biofortificadas (Silva *et al.*, 2022). Além disso, o iodo, quando aplicado em baixas concentrações, pode favorecer respostas fisiológicas associadas à atividade antioxidante e à eficiência fotossintética (Lima *et al.*, 2023).

O selênio atua principalmente na redução do estresse oxidativo, favorecendo a eliminação de espécies reativas de oxigênio (ROS) e protegendo estruturas celulares contra danos oxidativos. Além disso, esse elemento está associado à melhoria da atividade fotossintética, ao metabolismo de carboidratos e ao acúmulo de compostos de reserva, contribuindo para maior eficiência fisiológica das plantas (Silva *et al.*, 2022).

De forma complementar, o iodo apresenta importante atuação no metabolismo antioxidante e na manutenção da estabilidade celular. Segundo Lima *et al.* (2023), a aplicação de iodo em baixas concentrações pode aumentar a atividade de enzimas antioxidantes e favorecer a eficiência fotossintética, contribuindo para maior tolerância das plantas a condições de estresse ambiental.

A utilização de selênio e iodo na biofortificação vegetal tem despertado crescente interesse científico devido ao potencial desses elementos na melhoria da qualidade nutricional dos alimentos e nas respostas fisiológicas das plantas. Embora não sejam considerados essenciais para a maioria das espécies vegetais, estudos demonstram que, em baixas concentrações, ambos podem promover efeitos benéficos relacionados ao metabolismo das plantas (Lima *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2022).

Nesse contexto, os resultados observados no presente estudo sugerem que a aplicação conjunta desses micronutrientes pode ter contribuído para a manutenção do desempenho fisiológico das plantas durante o ciclo da cultura. Entretanto, a resposta observada variou entre os genótipos avaliados, indicando que a eficiência da biofortificação depende da interação entre fatores nutricionais, fisiológicos e genéticos, conforme relatado por Namorato *et al.* (2025).

Além disso, ressalta-se que os mecanismos relacionados à absorção, translocação e interação entre selênio e iodo em feijoeiro ainda necessitam de maiores investigações, especialmente em condições de campo, visando melhor compreensão dos efeitos desses elementos sobre a produtividade e a qualidade dos grãos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho integra um projeto de pesquisa de maior abrangência, desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), em parceria com a Universidade Federal de Lavras (UFLA), o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Segurança de Solo e Alimento (INCT-SSA) e o Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) – Campus Bambuí. O projeto tem como objetivo o desenvolvimento e a validação de estratégias de biofortificação agronômica destinadas ao aumento da qualidade nutricional dos alimentos produzidos no estado de Minas Gerais. As pesquisas conduzidas visam desenvolver tecnologias capazes de elevar os teores de micronutrientes essenciais à nutrição humana, como zinco, selênio, iodo e ferro, em culturas de relevância alimentar amplamente consumidas pela população brasileira.

Dessa forma, busca-se contribuir para a segurança alimentar e nutricional, auxiliar na redução da deficiência de micronutrientes na população e promover sistemas de produção mais sustentáveis, com a obtenção de alimentos de maior valor nutricional. As atividades desenvolvidas neste estudo fazem parte de um conjunto de ações que contemplam diferentes condições edafoclimáticas, avaliação de materiais genéticos, desenvolvimento de protocolos de manejo e capacitação de recursos humanos. Nesse contexto, o projeto integra atividades de pesquisa, inovação e transferência de tecnologia, contribuindo para o fortalecimento do setor agropecuário e para a geração de conhecimento científico aplicado à agricultura. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar os efeitos da biofortificação agronômica com zinco, selênio e iodo na produtividade de diferentes cultivares de feijão.

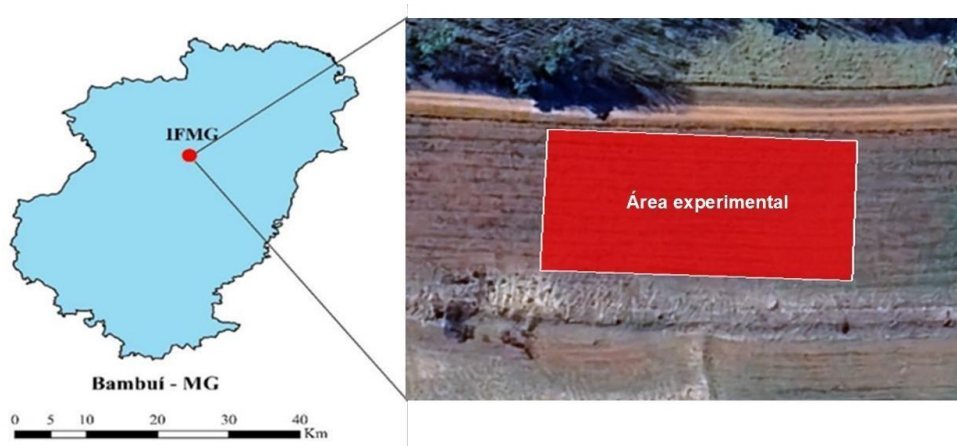
4.1. Área experimental e condução do experimento

O experimento descrito neste trabalho foi conduzido no âmbito do projeto de pesquisa intitulado “Qualidade Nutricional de Alimentos Mineiros na Cadeia Produtiva de Grãos” (APQ-05894-24), coordenado pela EPAMIG e aprovado, com financiamento, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por meio da Chamada nº 12/2024 – Fortalecimento e Consolidação da Pesquisa na EPAMIG. O estudo integra as atividades de pesquisa voltadas à validação de estratégias de biofortificação agronômica com micronutrientes em culturas alimentares, visando ao desenvolvimento de tecnologias capazes de incrementar a

qualidade nutricional dos grãos produzidos em Minas Gerais. Nesse contexto, o experimento apresentado, possui papel fundamental na validação da tecnologia de biofortificação do feijoeiro para as condições edafoclimáticas da região Centro-Oeste do estado. Paralelamente, experimentos com a mesma metodologia foram conduzidos nos municípios de Lambari, localizado na região Sul de Minas Gerais, e João Pinheiro, na região Noroeste do estado. A realização simultânea desses ensaios permite a avaliação da consistência e da eficiência das estratégias de biofortificação em diferentes ambientes de cultivo, contribuindo para a validação regional da tecnologia e ampliando seu potencial de adoção pelos produtores rurais mineiros.

O experimento foi conduzido no Setor de Produção Vegetal do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - Campus Bambuí, na região Centro-Oeste de Minas Gerais (Figura 1). A área de estudo está situada, por definição, entre as coordenadas geográficas centrais 20°02'16" de latitude sul, 46°00'31" de longitude oeste e altitude média de 690 m. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima do local é subtropical úmido (Cwa), com inverno frio e seco e verão quente e úmido (Alvares *et al.*, 2013).

Figura 1 – Localização da área de estudo localizada no IFMG Campus Bambuí



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A área onde foi desenvolvido o experimento, conhecida por “Vale das Cleusas”, possui solo classificado como Latossolo Vermelho. Foi realizada uma análise de solo a partir de 3 amostras simples na profundidade de 0 a 20 cm e 3 na profundidade de 20 a 40 cm, formando 2 amostras compostas, as quais foram enviadas ao laboratório para obtenção dos resultados. Os valores da análise de solo foram importantes para a avaliação da interferência dos teores dos micronutrientes

presentes no solo, que também foram incrementados via foliar pela biofortificação.

Previamente à semeadura, realizou-se o preparo da área experimental por meio de uma única operação de roçada mecanizada, visando à uniformização da cobertura vegetal presente na superfície do solo (Figura 2 - A). Posteriormente, utilizou-se uma semeadora-adubadora para a abertura dos sulcos de plantio e aplicação da adubação de base, empregando-se o fertilizante formulado NPK 06-30-16 na dose de 250 kg ha^{-1} (Figura 2 - B). A adubação de cobertura foi realizada quando a maioria das plantas se encontrava no estágio fenológico V3, mediante aplicação localizada em linha de ureia como fonte de nitrogênio, na dose equivalente a $60 \text{ kg de N ha}^{-1}$.

Figura 2 – Preparo da área e distribuição dos tratamentos na área experimental

A – Preparo do solo



B – Riscagem e adubação em sulco



C – Irrigação por aspersão convencional



D – Início da germinação



A semeadura foi realizada manualmente com o auxílio de matracas no dia 05 de junho de 2025, adotando-se uma população de 280.000 plantas ha^{-1} . Após a emergência das plantas, foram realizadas três aplicações fitossanitárias em diferentes períodos do ciclo da cultura, utilizando os inseticidas abamectina e clorpirifós, bem como o fungicida tebuconazol, com o objetivo de controlar insetos-praga e prevenir a ocorrência de doenças na área experimental.

O manejo das plantas daninhas foi realizado por meio de controle químico e manual. Em pré-emergência, aplicou-se o herbicida comercial Dual Gold®, seguido, após sete dias, da aplicação dos herbicidas Amplo® e Select One Pack®, em mistura, para o controle das plantas daninhas em pós-emergência. Complementarmente, foram efetuadas capinas manuais sempre que necessário para manutenção da área livre da interferência das plantas infestantes.

O experimento foi conduzido sob irrigação por aspersão convencional. O manejo da irrigação foi realizado com base na estimativa da evapotranspiração da cultura, sendo as lâminas de irrigação calculadas de forma a suprir a demanda hídrica das plantas ao longo do ciclo de cultivo.

4.2. Delineamento Experimental

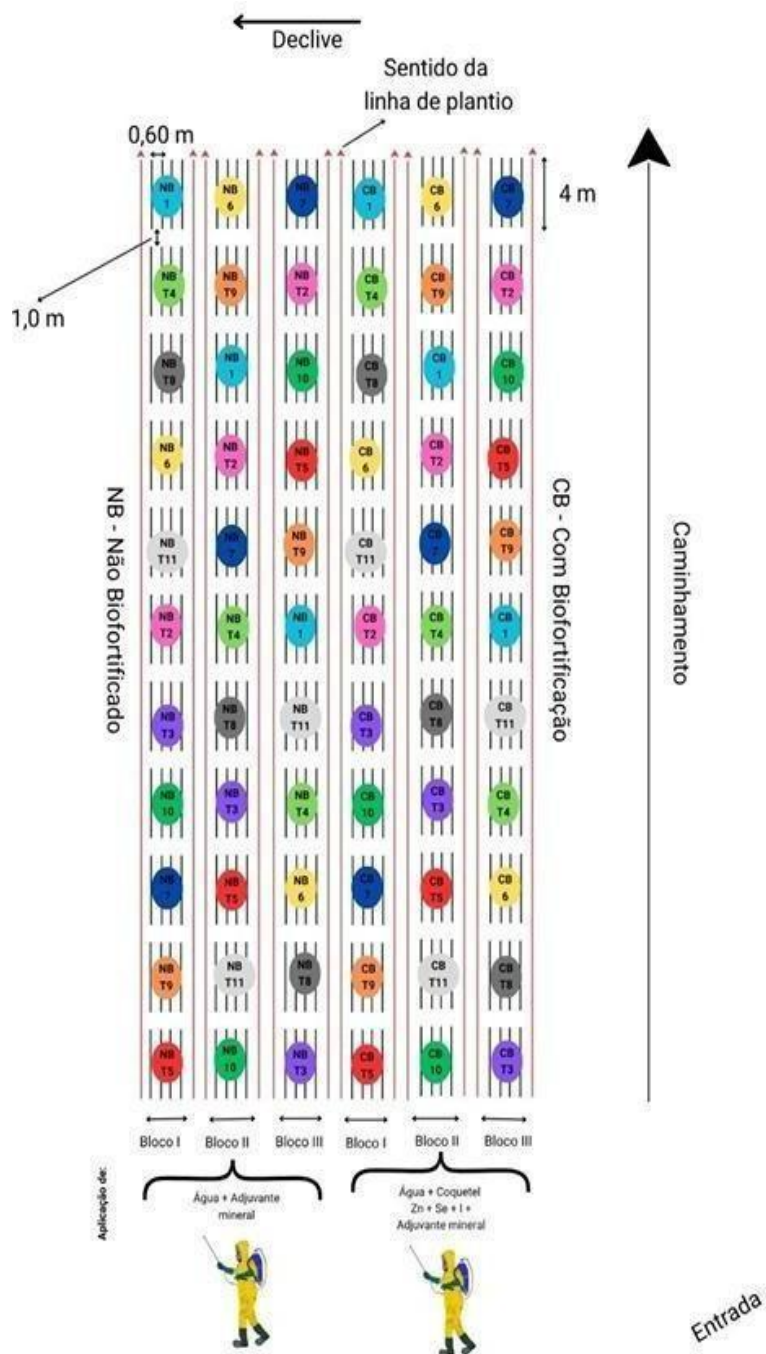
O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados (DBC), com três repetições, em esquema de parcelas subdivididas, sendo o fator principal composto por dois níveis e o fator secundário por onze níveis (2x11) (Figura 3). Nas parcelas principais foram alocados os tratamentos referentes à biofortificação agrônômica com micronutrientes, consistindo na aplicação de um coquetel contendo selênio, iodo e zinco e na ausência de aplicação desses elementos (controle), conforme Tabela 1. Nas subparcelas foram avaliados onze genótipos de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.): BRSMG UAI, BRSMG Majestoso, BRSMG Zape, BRSMG Marte, BRSMG Ouro Negro, BRSMG Realce, BRS FC409, BRSMG Amuleto, BRSMG Tesouro, BRSMG União e BRSMG Ouro Vermelho.

As doses aplicadas corresponderam a 10 g ha^{-1} de selênio, 200 g ha^{-1} de iodo e 1.000 g ha^{-1} de zinco, utilizando-se como fontes selenato de sódio (Na_2SeO_4), iodato de potássio (KIO_3) e sulfato de zinco (ZnSO_4), respectivamente. As quantidades totais dos micronutrientes foram fracionadas em duas aplicações, sendo a primeira realizada durante a fase vegetativa e a segunda durante a fase reprodutiva da cultura.

Cada unidade experimental foi constituída por quatro linhas de plantas com espaçamento de 0,60 m entre linhas e comprimento de 4,0 m. Entre parcelas adjacentes foi mantido um

espaçamento de 1,5 m, enquanto entre as extremidades das linhas experimentais foi adotada uma bordadura de 1,0 m, com o objetivo de minimizar possíveis interferências entre tratamentos. A área experimental total apresentou dimensões de 21,9 m de largura por 54,0 m de comprimento, correspondendo a uma área total de 1.182,6 m².

Figura 3 - Croqui de distribuição dos tratamentos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4.3. Colheita e análise dos dados

Ao final do ciclo da cultura, as duas linhas centrais de cada unidade experimental foram colhidas manualmente. Os grãos obtidos foram pesados e submetidos à determinação do teor de umidade. Posteriormente, a produtividade de grãos foi calculada com correção da umidade para 13%, sendo os resultados expressos em kg ha⁻¹.

Após a determinação da produtividade, uma amostra de 200 g de grãos (padrão metodológico) de cada unidade experimental foi coletada e submetida à classificação por tamanho, utilizando um conjunto de peneiras padronizadas. Com base nessa avaliação, foi determinada a proporção de grãos retida em cada peneira.

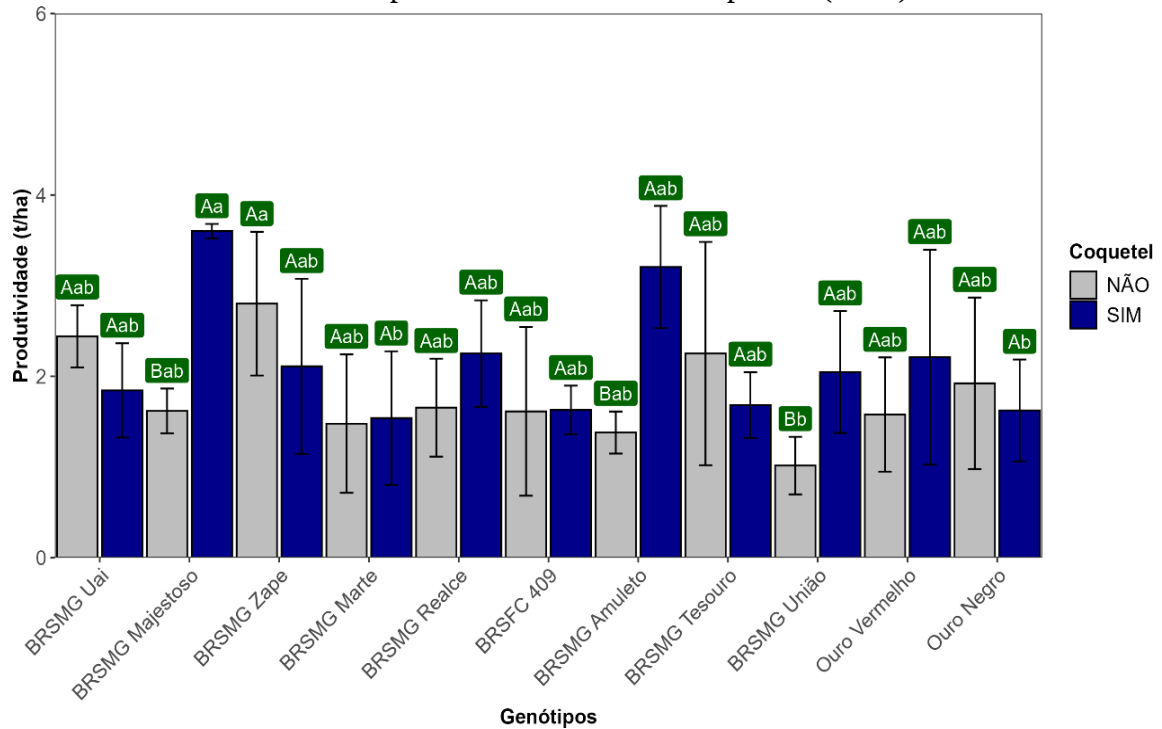
Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística por meio de modelos lineares mistos, utilizando o software R. Foram considerados como efeitos fixos os fatores genótipo, biofortificação com selênio e iodo (coquetel) e a interação entre eles. A heterogeneidade de variâncias entre os genótipos foi modelada por meio da estrutura de variância varIdent. Os pressupostos de normalidade, homogeneidade de variâncias e independência dos resíduos foram avaliados por meio da inspeção gráfica dos resíduos.

Após a verificação do atendimento aos pressupostos do modelo, procedeu-se à análise de variância (ANOVA), adotando-se o nível de significância de 5%. Quando constatado efeito significativo dos tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As comparações foram realizadas entre os níveis de biofortificação dentro de cada genótipo e entre os genótipos dentro de cada condição de biofortificação. Os resultados foram apresentados na forma de gráficos de barras, utilizando-se os valores de média ± erro-padrão da média.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a produtividade do feijoeiro houve interação entre os fatores estudados ($p < 0,05$). Houve aumento da produtividade com a aplicação do coquetel contendo zinco, selênio e iodo, em comparação à não aplicação do coquetel, nos genótipos BRSMG Majestoso, BRSMG Amuleto e BRSMG União, respectivamente, com aumentos de 122%, 133% e 101% (Figura 4). Para os demais genótipos não houve efeito da aplicação do coquetel.

Figura 4 - Produtividade de grãos de diferentes genótipos de feijoeiro submetidos à aplicação ou não de coquetel contendo zinco, selênio e iodo. Letras maiúsculas comparam a aplicação do coquetel dentro de cada genótipo, enquanto letras minúsculas comparam os genótipos, enquanto letras minúsculas comparam os genótipos dentro de cada condição de aplicação. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As barras representam a média $\pm$ erro-padrão ($n = 3$)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Observando os genótipos na condição de não aplicação do coquetel, houve diferença apenas entre o BRSMG Zape e o BRSMG União, em que o BRSMG Zape apresentou maior produtividade, com aumento de 175%, equivalente a uma diferença de $1,06 \text{ t ha}^{-1}$. Ao avaliar os demais genótipos, não foi observada diferença entre estes e os outros mencionados anteriormente na condição de não aplicação do coquetel. Ao avaliar o comportamento dos genótipos na condição de aplicação do coquetel, o genótipo BRSMG Majestoso apresentou maior produtividade em comparação aos genótipos Ouro Negro e BRSMG Marte, com aumento de 127%, equivalente a $2,02 \text{ t ha}^{-1}$. Ao avaliar os demais genótipos, também não foi observada diferença entre estes e os mencionados anteriormente na condição de aplicação do coquetel. Em geral, as maiores produtividades foram observadas nos genótipos BRSMG Majestoso ($3,6 \text{ t ha}^{-1}$) e BRSMG Amuleto ($3,2 \text{ t ha}^{-1}$) quando houve aplicação do coquetel.

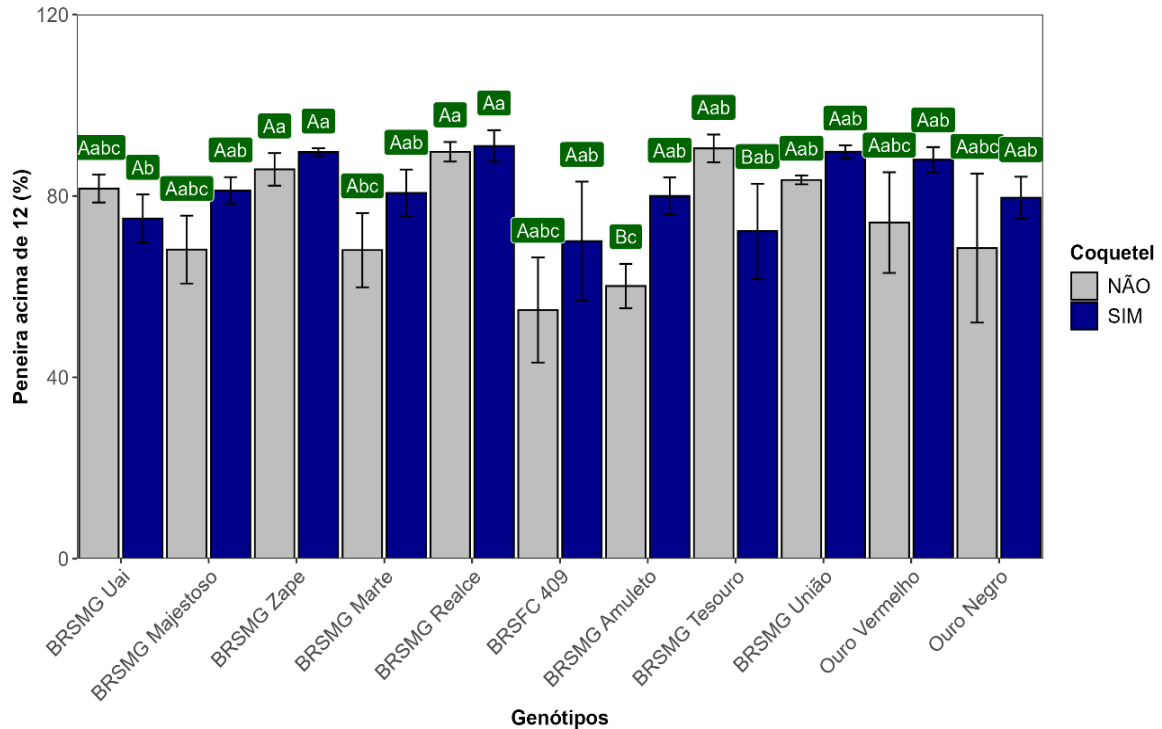
Comparando os resultados obtidos nestes estudo com outros na literatura, observa-se comportamento semelhante aos resultados descritos por Namorato *et al.* (2025), os quais verificaram diferenças significativas na produtividade de diferentes genótipos de feijoeiro submetidos à biofortificação com selênio. Nesse estudo, cultivares como Pérola e BRS Cometa apresentaram incrementos produtivos superiores em relação a outros genótipos, evidenciando variabilidade genética na resposta à adubação com selênio. Essa variabilidade também foi atribuída às diferenças na eficiência de absorção e utilização de nutrientes, especialmente relacionadas à expressão de transportadores específicos e à interação com o metabolismo do enxofre e nitrogênio. De forma semelhante, no presente estudo, genótipos como BRSMG Majestoso e BRSMG Amuleto apresentaram maiores produtividades, indicando maior eficiência fisiológica e melhor capacidade de conversão de recursos em rendimento.

Além disso, estudos de biofortificação indicam que a aplicação de micronutrientes pode promover incrementos produtivos quando há limitação nutricional prévia, o que pode justificar os aumentos observados em determinados genótipos neste estudo. Adicionalmente, conforme observado por Namorato *et al.* (2025), a aplicação de nutrientes associados à biofortificação pode resultar em aumento significativo da produtividade em alguns genótipos, enquanto outros não apresentam resposta expressiva, reforçando a dependência da interação entre genótipo e manejo nutricional.

Nesse contexto, considerando que o experimento foi conduzido em condições de campo, é plausível que as plantas tenham sido submetidas a estresses ambientais, como variações hídricas. Assim, a aplicação do coquetel pode ter contribuído para reduzir perdas produtivas, especialmente nos genótipos mais responsivos, explicando os incrementos observados.

Ao avaliar-se a porcentagem de grãos do feijoeiro retidos em diferentes peneiras de furos oblongos, observaram-se padrões de resposta distintos (Figura 5). De forma geral, observou-se uma elevada proporção de grãos retidos na peneira de > 12 mm para a maioria dos genótipos.

Figura 5 - Proporção de grãos na peneira acima de 12 mm para o feijoeiro, de acordo com o uso de diferentes genótipos submetidos ou não à aplicação de um coquetel contendo zinco, selênio e iodo. Barras seguidas da mesma letra maiúscula não indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) entre a aplicação ou não do coquetel em cada genótipo avaliado. Barras seguidas da mesma letra minúscula não indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) entre os diferentes genótipos em cada condição de aplicação do coquetel. Barras representam a média de cada tratamento, seguidas do erro associado ($n = 3$)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Ao avaliar a porcentagem de grãos de feijão na peneira > 12 mm, observou-se interação entre os fatores estudados ($p < 0,05$). Houve um aumento na proporção de grãos na peneira acima de 12 mm com a aplicação do coquetel contendo zinco, selênio e iodo, em comparação com a não aplicação do coquetel no genótipo BRSMG Amuleto, o que promoveu uma proporção de grãos na peneira > 12 mm de 80% . Entretanto, para o genótipo BRSMG Tesouro, o coquetel reduziu a proporção de grão na peneira > 12 mm em 20,2%. Para os demais genótipos não houve efeito da aplicação do coquetel.

Comparando os genótipos na condição de não aplicação do coquetel, quanto à proporção de grãos de feijão na peneira acima de 12 mm, houve diferença apenas entre o grupo formado pelos genótipos BRSMG Realce e BRSMG Zape, em comparação ao grupo formado pelos genótipos

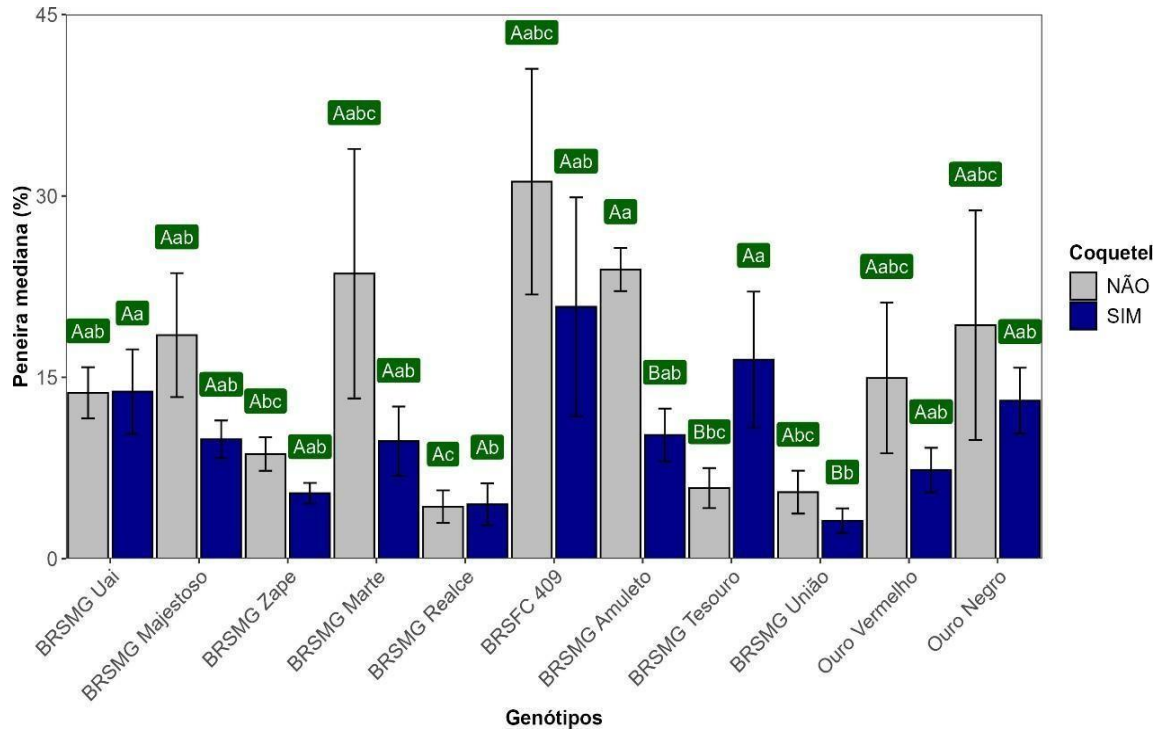
BRSMG Marte e BRSMG Amuleto, no qual o primeiro apresentou maior proporção, com aumento de 37% em relação ao segundo grupo. Ao avaliar os demais genótipos, não foi observada diferença entre estes e os outros mencionados anteriormente na condição de não aplicação do coquetel (Figura 5). Ao avaliar o comportamento dos genótipos na condição de aplicação do coquetel, o grupo formado pelos genótipos BRSMG Realce e BRSMG Zape apresentou maior proporção de grãos na peneira acima de 12 mm em comparação ao genótipo BRSMG Uai, o que corresponde a um aumento de 21% (Figura 5). Ao avaliar os demais genótipos, também não foi observada diferença entre estes e os mencionados anteriormente na condição de aplicação do coquetel (Figura 5).

Analisando a porcentagem de grãos de feijão na peneira mediana, observou-se interação entre os fatores estudados ($p < 0,05$). Houve um aumento na proporção de grãos na peneira mediana com a aplicação do coquetel contendo zinco, selênio e iodo, em comparação à não aplicação do coquetel no genótipo BRSMG Tesouro: um aumento de 182%, levando à proporção de grãos na peneira mediana de 16,5% (Figura 6). Entretanto, para o genótipo BRSMG União, o coquetel reduziu a proporção de grão na peneira mediana em 42,7%. Para os demais genótipos não houve efeito da aplicação do coquetel.

Comparando os genótipos dentro da condição de não aplicação do coquetel para a proporção de grãos de feijão na peneira mediana, somente houve diferença entre o genótipo BRSMG Amuleto comparado ao genótipo pelo BRSMG Realce, sendo que o BRSMG Amuleto apresentou uma maior proporção de grãos na peneira mediana, alcançado valores de 23,9% comparado aos 4,31 do BRSMG Realce (Figura 6).

Figura 6 - Proporção de grãos na peneira mediana (10 mm) do feijoeiro, de acordo com o uso de diferentes genótipos submetidos ou não à aplicação de um coquetel contendo zinco, selênio e iodo. Barras seguidas da mesma letra maiúscula não indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) entre a aplicação ou não do coquetel em cada genótipo avaliado. Barras seguidas da mesma letra minúscula não indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) entre os diferentes genótipos em cada condição de aplicação do coquetel. Barras representam a média de cada tratamento, seguidas do erro associado ($n = 3$)

7



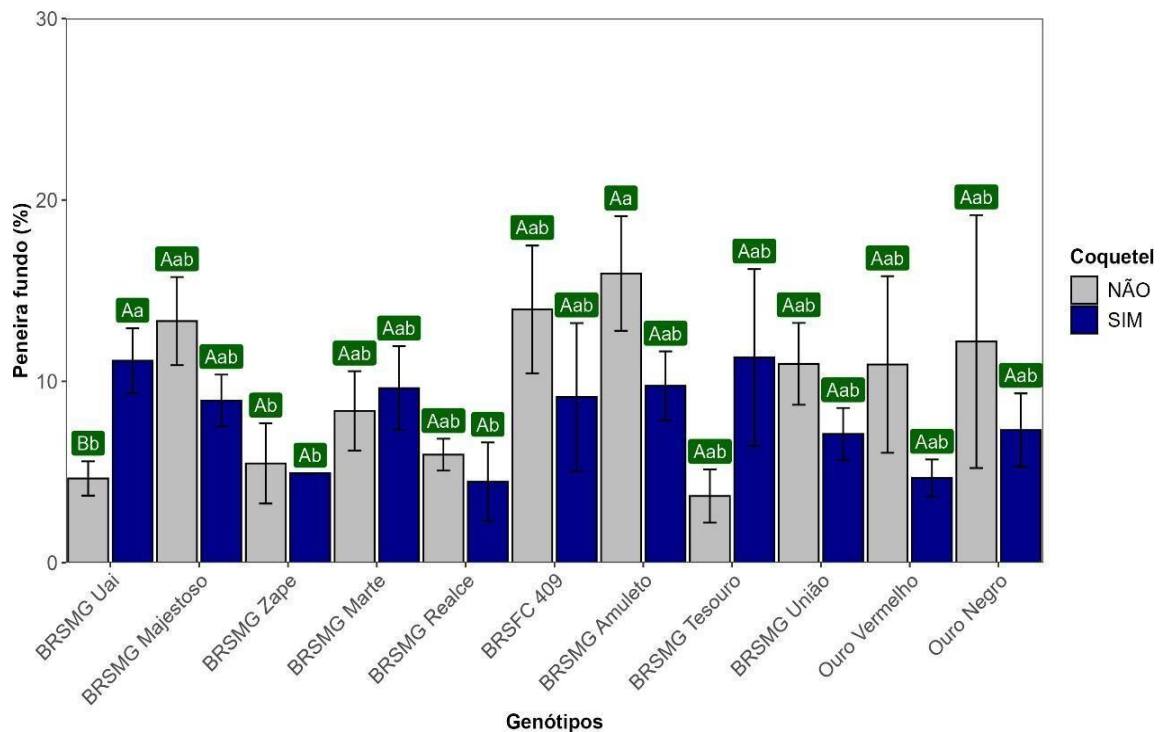
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Ao examinar os demais genótipos, não foi observada diferença entre estes e os outros mencionados anteriormente na condição de não aplicação do coquetel (Figura 6). Ao avaliar o comportamento dos genótipos na condição de aplicação do coquetel, o grupo formado pelos genótipos BRSMG Tesouro e BRSMG Uai apresentou maior proporção de grãos na peneira mediana em comparação ao grupo formado pelos genótipos BRSMG Realce e BRSMG União; o primeiro grupo apresentou média de 15% de grãos na peneira mediana (Figura 6). Ao avaliar os demais genótipos, também não foi observada diferença entre estes e os mencionados anteriormente na condição de aplicação do coquetel (Figura 6).

Observando a porcentagem de grãos de feijão no fundo da peneira, notou-se uma interação entre os fatores estudados ($p < 0,05$). Houve um aumento na proporção de grãos no fundo da peneira

com a aplicação do coquetel contendo zinco, selênio e iodo, em comparação com a não aplicação do coquetel no genótipo BRSMG Uai: um aumento de 140%, levando à proporção de grãos no fundo da peneira de 11% (Figura 7). Para os demais genótipos não houve efeito da aplicação do coquetel.

Figura 7 - Proporção de grãos no fundo da peneira para o feijoeiro, de acordo com o uso de diferentes genótipos submetidos ou não à aplicação de um coquetel contendo zinco, selênio e iodo. Barras seguidas da mesma letra maiúscula não indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) entre a aplicação ou não do coquetel em cada genótipo avaliado. Barras seguidas da mesma letra minúscula não indicam diferenças estatisticamente significativas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) entre os diferentes genótipos em cada condição de aplicação do coquetel. Barras representam a média de cada tratamento, seguidas do erro associado ($n = 3$)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Comparando os genótipos na condição de não aplicação do coquetel, observou-se diferença apenas entre o genótipo BRSMG Amuleto e o grupo formado pelos genótipos BRSMG Zape e BRSMG Uai, no qual o BRSMG Amuleto apresentou maior proporção de grãos no fundo da peneira, 15,9%, em comparação aos 5,1% do grupo formado pelos genótipos BRSMG Zape e BRSMG Uai (Figura 7). Ao avaliar o comportamento dos genótipos na condição de aplicação do

coquetel, o genótipo BRSMG Uai apresentou maior proporção de grãos no fundo da peneira em comparação com o grupo formado pelos genótipos BRSMG Zape e BRSMG Realce (Figura 7). O BRSMG Uai apresentou maior proporção de grãos no fundo da peneira, com 11,4%, em comparação aos 4,7% do grupo formado pelos genótipos BRSMG Zape e BRSMG Realce.

No presente estudo, observou-se predominância de grãos retidos em peneiras superiores a 12 mm, o que indica elevado potencial produtivo dos genótipos avaliados. Esse comportamento está em concordância com estudos que demonstram que cultivares melhoradas geneticamente apresentam maior capacidade de enchimento de grãos e uniformidade de tamanho, características desejáveis tanto para o mercado consumidor quanto para a indústria (Namorato *et al.*, 2025).

A variação observada na distribuição dos grãos entre as peneiras evidencia a forte influência da interação entre genótipo e manejo nutricional. Conforme relatado por Namorato *et al.* (2025), a resposta à biofortificação com alguns elementos, especialmente selênio, varia significativamente entre cultivares de feijoeiro, influenciando não apenas a produtividade, mas também características fisiológicas associadas ao enchimento de grãos.

No presente trabalho, genótipos como BRSMG Amuleto apresentaram incremento na proporção de grãos de maior calibre, indicando maior eficiência na utilização dos nutrientes fornecidos e maior capacidade de conversão de fotoassimilados em massa de grãos. Em contrapartida, os genótipos BRSMG Tesouro e BRSMG Uai apresentaram redução na proporção de grãos retidos na peneira > 12 mm, com aumento relativo nas peneiras inferiores.

Esse comportamento sugere que, nesses materiais, a aplicação do coquetel pode ter promovido alterações na dinâmica fonte-dreno, possivelmente aumentando o número de estruturas reprodutivas sem o correspondente suprimento de assimilados para o enchimento completo dos grãos. Como consequência, houve maior produção de grãos de menor calibre. Adicionalmente, essa resposta pode estar relacionada à menor eficiência desses genótipos na absorção, translocação ou utilização dos micronutrientes aplicados, reforçando que a biofortificação não apresenta efeito uniforme entre cultivares, sendo altamente dependente das características genéticas de cada material (Namorato *et al.*, 2025).

O zinco é um elemento essencial ao desenvolvimento vegetal, desempenhando funções fundamentais em diversos processos fisiológicos e metabólicos. Atua como cofator de inúmeras enzimas, participa da síntese de proteínas e está diretamente envolvido no metabolismo de carboidratos, influenciando o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Sadeghzadeh, 2013).

De acordo com Sadeghzadeh (2013), o zinco está relacionado à síntese de triptofano, precursor do ácido indolacético (AIA), hormônio responsável pelo crescimento e alongamento celular. Dessa forma, sua adequada disponibilidade favorece a divisão e expansão celular, contribuindo para o desenvolvimento dos tecidos vegetais e influenciando processos associados ao enchimento de grãos.

Além disso, o zinco exerce papel importante na manutenção da integridade das membranas celulares e na regulação da atividade fotossintética, promovendo maior eficiência na produção e no transporte de fotoassimilados. Esse fator é determinante durante a fase reprodutiva das culturas, uma vez que o enchimento dos grãos depende diretamente da disponibilidade desses compostos (Sadeghzadeh, 2013).

Em feijoeiro, a nutrição adequada com zinco está associada à melhoria dos componentes de produção, como número de vagens por planta e número de grãos por vagem, refletindo diretamente no rendimento da cultura e nos processos de formação e enchimento dos grãos (Teixeira *et al.*, 2008). Nesse contexto, embora o zinco não atue isoladamente na determinação do tamanho dos grãos, sua influência sobre o metabolismo vegetal e a eficiência fisiológica contribui indiretamente para a formação de grãos mais bem desenvolvidos.

Por fim, ressalta-se que a resposta à aplicação de zinco pode variar em função do genótipo e das condições nutricionais da planta, sendo sua eficiência dependente da capacidade de absorção, translocação e utilização do nutriente, bem como da interação com outros fatores do ambiente produtivo.

No contexto deste estudo, a atuação conjunta de selênio e iodo pode ter sido determinante para a manutenção do enchimento de grãos em condições ambientais variáveis. No entanto, essa proteção fisiológica nem sempre resulta em aumento do tamanho dos grãos, podendo, em alguns casos, priorizar a manutenção da produção total, o que explica a redistribuição observada entre as peneiras em determinados genótipos (Lima *et al.*, 2023; Andrade *et al.*, 2024; Namorato *et al.*, 2025).

A análise conjunta dos resultados evidencia que o aumento da produtividade nem sempre está diretamente associado ao aumento do tamanho dos grãos. Em alguns genótipos, o incremento produtivo pode ocorrer via aumento no número de grãos, e não necessariamente no seu calibre.

Esse comportamento está relacionado à dinâmica da relação fonte-dreno, em que a planta pode distribuir os fotoassimilados entre um maior número de estruturas reprodutivas, resultando

em grãos menores. Por outro lado, genótipos com maior eficiência fisiológica conseguem manter tanto o número quanto o tamanho dos grãos. Nesse sentido, os resultados observados corroboram estudos que indicam que a biofortificação pode promover ganhos produtivos sem comprometer a qualidade dos grãos, desde que haja adequada interação entre genótipo e manejo nutricional (Namorato *et al.*, 2025; Andrade *et al.*, 2024).

6. CONCLUSÃO

A biofortificação agronômica com zinco, selênio e iodo influenciou os parâmetros agronômicos avaliados de forma dependente do genótipo de feijoeiro. A aplicação do coquetel promoveu incrementos significativos na produtividade dos genótipos BRSMG Majestoso, BRSMG Amuleto e BRSMG União, evidenciando que determinados materiais genéticos apresentam maior responsividade à suplementação foliar desses micronutrientes.

Em relação à classificação dos grãos por peneiras, a resposta à biofortificação também variou entre os genótipos avaliados. O genótipo BRSMG Amuleto apresentou aumento na proporção de grãos retidos na peneira superior a 12 mm, indicando melhoria na qualidade comercial dos grãos. Por outro lado, alguns genótipos apresentaram redução na proporção de grãos de maior calibre ou aumento da participação de grãos em peneiras inferiores, demonstrando que os efeitos da biofortificação sobre a qualidade física dos grãos não são uniformes entre cultivares.

Os resultados confirmam que diferentes cultivares de feijão apresentam respostas distintas à aplicação foliar de zinco, selênio e iodo, evidenciando a existência de interação entre o genótipo e a biofortificação agronômica. Dessa forma, a eficiência dessa estratégia depende das características genéticas de cada cultivar.

Conclui-se que a biofortificação agronômica com zinco, selênio e iodo apresenta potencial para ser utilizada no cultivo do feijoeiro, uma vez que pode promover ganhos de produtividade e, em alguns genótipos, melhorar características relacionadas à qualidade comercial dos grãos, sem comprometer o desempenho agronômico da maioria dos materiais avaliados. Entre os genótipos estudados, BRSMG Majestoso e BRSMG Amuleto destacam-se pelo elevado potencial produtivo associado à aplicação do coquetel de micronutrientes.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Â. F. B. *et al.* **BRSMG Majestoso: cultivar de feijão tipo carioca para Minas Gerais.** Crop Breeding and Applied Biotechnology, Viçosa, v. 7, n. 4, p. 403-405, 2007.
- ALVES, S. J. F. *et al.* **Biofortificação agronômica com zinco em feijão-caupi.** Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1052656/biofortificacao-agronomica-com-zinco-em-feijao-caupi>. Acesso em: 22 jun. 2025.
- ANDRADE, O. V. S. *et al.* **The role of potassium iodate in mitigating the damages of water deficit in coffee plants.** Journal of Soil Science and Plant Nutrition, Cham, v. 24, 2024. DOI: 10.1007/s42729-024-01822-9.
- BISWAS, P. S.; DUTTA, R.; BHATTACHARJEE, S. **Agronomic biofortification: an emerging tool to combat hidden hunger in South Asia.** Current Science, Bangalore, v. 118, n. 2, p. 187-194, 2020.
- CAMBRAIA, T. L. L. *et al.* **Biofortificação agronômica de grãos de feijão com zinco.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 54, e01003, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/nyrtQQrpw4tcB5mjgm8L7yC/>. Acesso em: 1 out. 2025.
- CANDIDO, A. P. *et al.* **Estado nutricional de iodo em gestantes brasileiras: resultados do estudo multicêntrico EMDI-Brasil.** Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, v. 30, n. 8, e04962024, 2025.
- CARBONELL, S. A. M.; CHIORATO, A. F.; BEZERRA, L. M. C. A planta e o grão de feijão e as formas de apresentação aos consumidores. In: FERREIRA, C. M.; BARRIGOSI, J. A. F. (org.). **Arroz e feijão: tradição e segurança alimentar.** Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 101-116.
- COELHO, J. F. P. **Biofortificação de alface com iodo em cultivo hidropônico.** 2021. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.
- COELHO, R. C.; BARSOTTI, R. C. F.; MALTEZ, H. F.; LOPES-JÚNIOR, C. A.; BARBOSA, H. S. **Expanding information on the bioaccessibility and bioavailability of iron and zinc in biofortified cowpea seeds.** Food Chemistry, Amsterdam, v. 347, 129027, 2021.
- CORBO, J. Z. F. **Biofortificação do feijão e do milho com selênio.** 2014. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico, Campinas, 2014. Disponível em: https://www.iac.sp.gov.br/areadoinstitutoposgraduacao/repositorio/storage/teses_dissertacoes/1005.pdf. Acesso em: 8 jun. 2026.
- CUNHA, D. C. *et al.* **Efeitos do selênio na resposta inflamatória e metabolismo antioxidante.** Revista Brasileira de Obesidade, Nutrição e Emagrecimento, São Paulo, v. 14, n. 89, p. 152-165,

2020.

Dias, L. O. da F., Peil, R. M. N., Rombaldi, C. V., Mauch, C. R., & Perin, L. (2023). **Biofortificação agrônômica com zinco: respostas biométricas e fitoquímicas de microverdes de beterraba, repolho roxo e manjeriço.** REVISTA DELOS, 16(47), 2719–2737. <https://doi.org/10.55905/rdelosv16.n47-012>

EMBRAPA. **BRSMG Uai:** cultivar de feijão tipo carioca com planta de arquitetura ereta. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2018.

EMBRAPA. **BRSMG União:** cultivar de feijão comum de grãos tipo jalo. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2011.

EMBRAPA. **Cultivares de feijão com maiores teores de ferro, zinco e proteína nos grãos.** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2018.

EMBRAPA. **Quantidade de selênio nas castanhas-do-Brasil varia de acordo com a região.** Brasília, DF: Embrapa, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/11010983>. Acesso em: 1 out. 2025.

EMBRAPA. Rede BioFORT. Brasília, DF: **Embrapa**, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/biofort>. Acesso em: 2 out. 2025.

EPAMIG. **Quatro novas cultivares de feijão para Minas Gerais são recomendadas pela EPAMIG, UFV, UFLA e Embrapa.** Belo Horizonte: EPAMIG, 2021. Disponível em: <https://www.epamig.br/quatro-novas-cultivares-de-feijao-para-minas-gerais-sao-recomendadas-pela-epamig-ufv-ufla-e-embrapa/>. Acesso em: 8 jun. 2026.

EPAMIG. **Novas cultivares de feijão para Minas Gerais.** Belo Horizonte: EPAMIG, 2024.

FIGUEIREDO, M. A. *et al.* **Zinc and selenium accumulation and their effect on iron bioavailability in common bean seeds.** Plant Physiology and Biochemistry, Paris, v. 111, p. 193-202, 2017.

FIGUEIREDO, M. N. **Biofortificação do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) por meio da aplicação foliar de zinco associado ao ácido cítrico.** 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/29523>. Acesso em: 22 jun. 2025.

GALIĆ, L.; VINKOVIĆ, T.; RAVNJAK, B.; LONČARIĆ, Z. **Agronomic biofortification of significant cereal crops with selenium: a review.** Agronomy, Basel, v. 11, n. 5, p. 1015, 2021. DOI: 10.3390/agronomy11051015.

LIMA, J. S. *et al.* **Soybean plants exposed to low concentrations of potassium iodide have better tolerance to water deficit through the antioxidant enzymatic system and**

photosynthesis modulation. Plants, Basel, v. 12, n. 13, art. 2555, 2023. DOI: 10.3390/plants12132555.

MAYER, E. M. **Estado nutricional de iodo da população brasileira: inquéritos e estudos nacionais.** 2023. Dissertação (Mestrado em Nutrição Humana) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023.

MEDEIROS-NETO, G.; KNOX, A. P.; ROSA, M. **Iodine nutrition in Brazil: where do we stand?** Arquivos Brasileiros de Endocrinologia e Metabologia, São Paulo, v. 53, n. 4, p. 470-477, 2009.

MELO, L. C. et al. BRSMG Realce: cultivar de feijão comum de grãos rajados. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2021.

NAMORATO, F. A. et al. **Selenium biofortification with Se-enriched urea and Se-enriched ammonium sulfate fertilization in different common bean genotypes.** Agronomy, Basel, v. 15, n. 2, art. 440, 2025. DOI: 10.3390/agronomy15020440.

PAULA JÚNIOR, T. J. *et al.* **Ouro Negro e Ouro Vermelho:** cultivares de feijão recomendadas para Minas Gerais e Rio de Janeiro. Viçosa: EPAMIG; UFV; Embrapa, 1991.

POTAFOS. **Nutri-fatos:** informação agrônômica sobre nutrientes para as culturas. Tradução e adaptação de Eurípedes Malavolta. Arquivo do Agrônomo, n. 10. Piracicaba: POTAFOS, 1996.

ROSA, T. F. **Efeitos de fontes e doses de selênio na produtividade e qualidade de grãos de feijão.** 2020. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2020.

SADEGHZADEH, B. **A review of zinc nutrition and plant breeding.** Journal of Soil Science and Plant Nutrition, Temuco, v. 13, n. 4, p. 905-927, 2013. DOI: 10.4067/S0718-95162013005000072.

SANTOS, R. M. **Biofortificação de feijão com zinco:** efeitos de fontes, formas de aplicação, doses e do fungo *Pochonia chlamydosporia*. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/30f55a16-931c-420b-9530-ffcd63bdcd22>. Acesso em: 22 jun. 2025.

SILVA, V. M. *et al.* **Agronomic biofortification of cowpea with zinc:** variation in primary metabolism responses and grain nutritional quality among 29 diverse genotypes. Plant Physiology and Biochemistry, Amsterdam, v. 162, p. 378-387, 2021.

TEIXEIRA, I. R.; BORÉM, A.; ARAÚJO, G. A. A.; ANDRADE, M. J. B. **Fontes e doses de zinco no feijoeiro cultivado em diferentes épocas de semeadura.** Acta Scientiarum. Agronomy, Maringá, v. 30, n. 2, p. 255-259, 2008. DOI: 10.4025/actasciagron.v30i2.1731.

UFLA. **Feijão com mais nutrientes: pesquisa identifica potencial do feijoeiro-comum à biofortificação.** Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2016. Disponível em: <https://ufla.br/noticias/pesquisa/10337-feijao-com-mais-nutrientes-pesquisa-identifica-potencial-do-feijoeiro-comum-a-biofortificacao>. Acesso em: 1 out. 2025.

VASCONCELOS, A. C. N. **Estratégias de adubação visando à biofortificação com zinco em grãos de feijão da cultivar carioca BRS MG Uai.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal de Minas Gerais, Bambuí, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ifmg.edu.br/items/bb0868ba-4e7b-4b37-ae93-d3334706ff08>. Acesso em: 1 out. 2025.

VIDIGAL, J. C. B. **Biofortificação agronômica com zinco em cultivares de feijoeiro-comum dos grupos preto e carioca.** 2020. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2020. Disponível em: <http://tede.unicentro.br:8080/jspui/handle/jspui/2299>. Acesso em: 22 jun. 2025.