



JOSÉ EULÁRIO LAMPI DIQUE

**INTERAÇÃO GENÓTIPOS POR AMBIENTES NA
PROSPECÇÃO DE GENITORES PARA FINS DE
MELHORAMENTO DE FEIJÃO COMUM DE GRÃOS
ESPECIAIS**

**LAVRAS – MG
2025**

JOSÉ EULÁRIO LAMPI DIQUE

**INTERAÇÃO GENÓTIPOS POR AMBIENTES NA PROSPECÇÃO DE GENITORES
PARA FINS DE MELHORAMENTO DE FEIJÃO-COMUM DE GRÃOS ESPECIAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área
de concentração em Genética e Melhoramento de
Plantas, para obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Vinícius Quintão Carneiro
Orientador

Profa. Dra. Elaine Aparecida de Souza
Coorientadora

**LAVRAS –MG
2025**

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

Dique, José Eulário Lampi .

Interação genótipos por ambientes na prospecção de genitores para fins de
melhoramento de feijão-comum de grãos especiais / José Eulário Lampi Dique. -
2025.

78 p. : il.

Orientador: Vinícius Quintão Carneiro

Coorientadora: Elaine Aparecida de Souza

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2025.

Bibliografia.

1. Phaseolus vulgaris L.. 2. feijão andino. 3. interação genótipos por ambiente. I.
Quintão Carneiro, Vinícius. II. Aparecida de Souza, Elaine . III. Universidade Federal
de Lavras. IV. Título.

JOSÉ EULÁRIO LAMPI DIQUE

**INTERAÇÃO GENÓTIPOS POR AMBIENTES NA PROSPECÇÃO DE GENITORES
PARA FINS DE MELHORAMENTO DE FEIJÃO-COMUM DE GRÃOS ESPECIAIS**

**GENOTYPE AND ENVIRONMENT INTERACTION IN THE SELECTION OF
PARENTAL LINES FOR THE BREEDING OF COMMON BEAN WITH SPECIAL
GRAIN TYPES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área
de concentração em Genética e Melhoramento de
Plantas, para obtenção do título de Doutor.

APROVADO em 17 de julho de 2025

Dra. Lucimara Cruz de Souza UFLA

Dr. José Eustáquio de Souza Carneiro UFV

Dr. Tiago de Souza Marçal UFLA

Dra. Christiane Augusta Diniz Melo UFLA

Prof. Dr. Vinícius Quintão Carneiro
Orientador

**LAVRAS – MG
2025**

“Tentar e falhar é, pelo menos, aprender. Não chegar a tentar é sofrer a inestimável perda do que poderíamos ter sido”.

(Geraldo Eustáquio de Souza)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde, sabedoria, por todas as oportunidades oferecidas ao longo da minha vida e por sempre me fortalecer nos momentos mais défices.

Aos meus pais, Eulário Lampi Dique e Berta Lisquene, pelo amor incondicional, apoio constante e pelos valiosos ensinamentos de vida.

Aos meus irmãos, Maria, Sara e João, pelo carinho e companheirismo ao longo de toda a minha trajetória.

À minha namorada, Judite Luís Andreque, pelo amor, dedicação e apoio durante esta etapa tão importante da minha vida.

À minha família e a todos que estiveram ao meu lado torcendo por mim, agradeço profundamente pelo apoio, carinho, incentivo, conselhos e pelos momentos de alegria e descontração. Agradeço, em especial, a Jone, Lázaro, Elidio, Chaora, Alcides, Massunguire, Santa, Mercês, Adelina e tantos outros que, com suas ideias, palavras de encorajamento e presença constante, contribuíram imensamente para que eu seguisse em frente.

Meus sinceros agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas da Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela oportunidade, suporte e estrutura que me permitiram alcançar o título de doutor.

Ao professor Vinícius Quintão Carneiro, meu orientador, pelos ensinamentos, paciência, confiança e pela preocupação com minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

À professora Elaine Aparecida de Souza, minha coorientadora, pela dedicação diária, paciência, disponibilidade e pelos conhecimentos fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao professor José Eustáquio de Souza Carneiro, pela constante ajuda, pela disposição em auxiliar sempre que necessário e pelo fornecimento de materiais para os experimentos.

Aos demais professores do programa, Tiago Marçal, Flávia, Evandro, Vânia, João Cândido, José Airton, Welson e Lucimara, pelos valiosos ensinamentos compartilhados ao longo do curso.

À Dra. Jussara, pela colaboração, especialmente na confecção e organização dos dados de qualificação.

Ao Pastor Alexandre, ao Pastor Jeferson, Leandro e a todos os irmãos da igreja, pelos momentos de comunhão e apoio espiritual.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para esta conquista, meu muito obrigado. Em especial, aos colegas do Programa de Melhoramento de Feijão da UFLA: Rafaela, Ana Alice, Ana Luísa, Fernanda, João, Letícia, Aline, Andreza, Danilo, João Vitor, Bruno,

Constantino, Guilherme e Eduarda. Cada um de vocês foi, de alguma forma, essencial nessa jornada, tornando o ambiente de trabalho mais leve, alegre e produtivo.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, pelo companheirismo, amizade e pelos momentos de descontração que ajudaram a tornar essa caminhada mais equilibrada.

Aos funcionários do Departamento de Biologia da UFLA — Rafael, Zélia, Rafaela, Miller, e aos técnicos de campo Leo, Edésio, Anderson e Eduardo, pelo apoio, dedicação e amizade no dia a dia.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos durante o doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

Ao Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM), especialmente ao Centro Zonal Centro, pela autorização que possibilitou a continuidade dos meus estudos.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho e para o meu crescimento pessoal e profissional ao longo desses quatro anos, deixo aqui meus mais sinceros agradecimentos.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO GERAL

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é um alimento essencial na dieta da população brasileira e apresenta grande relevância socioeconômica. Os feijões de origem andina, conhecidos como especiais são pouco produzidos no Brasil, porém apresentam grande demanda internacional. Este nicho de mercado tem sido pouco explorado e uma das causas é a baixa disponibilidade de cultivares com este padrão de grãos. Assim, os programas de melhoramento do feijoeiro do País desempenham importante papel no desenvolvimento de novas cultivares com características para atender este mercado. Porém, um caráter de extrema importância para os feijões especiais é a qualidade dos grãos, uma vez que a aceitação comercial desses feijões está fortemente associada a caracteres como tamanho, formato e cor. Para alcançar o objetivo de recomendar novas cultivares com esses fenótipos, os programas de melhoramento devem ser assertivos na orientação dos cruzamentos. Para isso, esses devem embasar em informações precisas e acuradas obtidas em avaliações de campo, assim como a partir de caracterizações em laboratório de caracteres associados aos grãos. Nesse contexto, novas metodologias vêm sendo desenvolvidas, com destaque para o uso de ferramentas computacionais baseadas em uso de imagens digitais, que têm demonstrado eficiência, rapidez e elevado potencial de aplicação em programas de melhoramento genético. Com objetivo de auxiliar os programas de melhoramento de feijões especiais, principalmente na etapa de escolha de genitores, foram realizados neste trabalho dois estudos principais. O primeiro consistiu na caracterização fenotípica de linhagens de feijões especiais quanto ao tamanho, formato e cor dos grãos. Os resultados deste trabalho permitiram identificar potenciais genitores com fenótipos desejáveis alinhados aos padrões comerciais exigidos pelo mercado. O segundo estudo teve como objetivo apresentar uma estratégia multi-característica e multiambiente para a seleção de genitores e orientação de cruzamentos no melhoramento genético. Essa abordagem metodológica possibilitou a identificação de linhagens com desempenho produtivo superior em diferentes épocas de cultivo. Além da produtividade de grãos, destacaram-se linhagens com alta qualidade comercial dos grãos e arquitetura ereta das plantas.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L.; feijão andino; interação genótipos por ambiente.

ABSTRACT

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is an essential food in the diet of the Brazilian population and holds great socioeconomic importance. Andean-origin beans, known as “specialty beans,” are scarcely produced in Brazil, yet they have high international demand. This market niche has been underexplored, and one of the main reasons is the limited availability of cultivars with this specific grain pattern. Thus, bean breeding programs in the country play a key role in developing new cultivars with traits aimed at meeting this market demand. However, a trait of utmost importance for specialty beans is grain quality, as the commercial acceptance of these beans is strongly associated with attributes such as size, shape, and color. To achieve the goal of recommending new cultivars with these phenotypes, breeding programs must be assertive in guiding crosses. For that, they must be based on precise and accurate information obtained through field evaluations, as well as laboratory characterizations of grain-associated traits. In this context, new methodologies have been developed, with emphasis on the use of computational tools based on digital image analysis, which have shown efficiency, speed, and great potential for application in genetic improvement programs. Aiming to support breeding programs for specialty beans, particularly in the stage of parent selection, two main studies were conducted in this work. The first consisted of the phenotypic characterization of specialty bean lines regarding grain size, shape, and color. The results allowed the identification of potential parents with desirable phenotypes aligned with commercial market standards. The second study aimed to present a multi-trait and multi-environment strategy for the selection of parents and the planning of crosses in bean breeding. This methodological approach enabled the identification of lines with superior productive performance across different growing seasons. In addition to grain yield, lines with high commercial grain quality and upright plant architecture were also highlighted.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L.; andean beans; genotype-by-environment interaction.

INDICADORES DE IMPACTO

O presente estudo teve como objetivo auxiliar os programas de melhoramento de feijões especiais proporcionando informações sobre arquitetura de plantas, produtividade e qualidade comercial de grãos assim como da adaptabilidade de potenciais genitores desse grupo. O estudo contempla linhagens de feijões dos grupos cranberry (rajado), vermelho, branco, entre outros, que possuem demanda no Brasil, mas especialmente no mercado internacional. No Brasil, embora ainda sejam produzidos em menor escala, esses feijões são comercializados em feiras por preços superiores aos dos feijões do grupo mesoamericano, evidenciando seu valor agregado e potencial de mercado. As informações geradas nesse trabalho serão de grande utilidade para os programas de melhoramento de modo a torna-los mais eficazes no desenvolvimento de novas cultivares com fenótipos de interesse. Assim, será possível impactar a cadeia produtiva dos feijões especiais, que ainda é pequena. Dessa forma, os resultados obtidos apresentam contribuições práticas e científicas, beneficiando diretamente melhoristas, produtores e demais agentes envolvidos na cadeia produtiva do feijão. Este trabalho também envolve inovações tecnológicas aplicadas ao melhoramento do feijoeiro. Exemplo disso é o primeiro artigo que aplicou técnicas de análise de imagens para caracterizar linhagens de feijões especiais quanto ao tamanho, formato e cor dos grãos. O uso de técnicas de análise de imagens permitiu realizar avaliações precisas, eficientes e automatizadas na quantificação dessas características. Assim, observou-se a partir desse trabalho novas ferramentas para tornar mais eficiente os programas de melhoramento. Além das aplicações técnico-científicas, destaca-se que todo o trabalho envolveu estudantes em nível de graduação e pós-graduação, permitindo a formação de recursos humanos na área de melhoramento genético de plantas.

.

IMPACT INDICATORS

The present study aimed to support breeding programs for specialty beans by providing information on plant architecture, grain yield, commercial grain quality, and the adaptability of potential parents from this group. The study includes lines of beans from the cranberry (speckled), red, white, and other groups that are in demand in Brazil, but especially in the international market. In Brazil, although still produced on a smaller scale, these beans are sold at fairs for higher prices than those from the Mesoamerican group, highlighting their added value and market potential. The information generated in this work will be highly useful for breeding programs, making them more effective in developing new cultivars with desirable phenotypes. In this way, it will be possible to impact the production chain of specialty beans, which is still relatively small. Therefore, the results obtained present both practical and scientific contributions, directly benefiting breeders, producers, and other stakeholders involved in the common bean value chain. This work also involves technological innovations applied to bean breeding. An example is the first article to apply image analysis techniques to characterize specialty bean lines in terms of grain size, shape, and color. The use of image analysis techniques enabled accurate, efficient, and automated assessments in quantifying these traits. As such, this study highlights new tools to enhance the efficiency of breeding programs. In addition to the technical and scientific applications, it is worth noting that the entire project involved undergraduate and graduate students, contributing to the training of human resources in the field of plant breeding.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	13
1. INTRODUÇÃO GERAL	13
REFERÊNCIAS	17
SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	21
ARTIGO 1– CARACTERIZAÇÃO FENOTÍPICA DE GRÃOS DE LINHAGENS DE FEIJÃO ESPECIAL POR MEIO DE ANÁLISE DE IMAGEM DIGITAL.....	21
1. INTRODUÇÃO.....	24
2. MATERIAL E MÉTODO.....	26
2.1 Avaliação por imagem dos caracteres físicos e de cor dos grãos.....	26
2.2 Análises Estatísticas	28
3. RESULTADOS	29
4. DISCUSSÃO.....	38
5. CONCLUSÃO.....	41
MATERIAL SUPLEMENTAR	46
ARTIGO 2- ANÁLISE DE FATORES COMO ESTRATÉGIA NA SELEÇÃO DE GENITORES E ORIENTAÇÃO DE CRUZAMENTOS NO MELHORAMENTO DE FEIJÃO COMUM	52
1. INTRODUÇÃO.....	55
2. MATERIAL E MÉTODO.....	57
2.1 Avaliação do material vegetal	57
2.2 Análises Estatísticas	58
3. RESULTADOS	60
4. DISCUSSÃO.....	67
5. CONCLUSÃO.....	70
TERCEIRA PARTE	71
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
7. REFERÊNCIAS	72
MATERIAL SUPLEMENTAR	78

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO GERAL

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das principais leguminosas no mundo e representa um dos alimentos mais tradicionais da culinária brasileira. Trata-se de uma espécie amplamente reconhecida por ser uma excelente fonte de proteínas de alta qualidade, carboidratos, vitaminas, fibras alimentares e minerais como o ferro (Akond *et al.*, 2011; Blair, 2013; Hummel *et al.*, 2018; Ramírez *et al.*, 2018; Nadeem *et al.*, 2021).

O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de feijão-comum. A cultura é cultivada tanto em baixo quanto em alto nível tecnológico com emprego de irrigação (Capanema *et al.*, 2019; EMBRAPA, 2024). Na safra 2023/2024, a produção nacional de feijão comum foi de aproximadamente 3,06 milhões de toneladas, distribuídas em uma área de 2,78 milhões de hectares, com produtividade média de 1676 kg ha⁻¹ (EMBRAPA, 2024).

Apesar dos avanços no manejo e na adoção de tecnologias, essa produtividade ainda é considerada baixa em relação ao potencial produtivo da cultura, que pode superar 3000 kg ha⁻¹ em áreas irrigadas e com manejo adequado (Carneiro *et al.*, 2014; Guimarães; De Souza, 2019; Holtz *et al.*, 2018; EMBRAPA, 2024).

O feijão-comum apresenta ampla diversidade quanto ao tamanho, cor e formato dos grãos. Essas características são determinantes para a aceitação e comercialização de novas cultivares, influenciando diretamente sua adoção pelos produtores (Barili *et al.*, 2016; Mendoza, 2017; Lemos *et al.*, 2020). No Brasil, os feijões mais cultivados pertencem ao pool gênico mesoamericano, com destaque para os grupos comerciais carioca e preto, que correspondem à 70 e 12% da produção nacional, respectivamente (CONAB, 2023; MAPA, 2024; EMBRAPA, 2024). O restante da produção corresponde a outros tipos de feijões como os especiais (pool gênico andino), que representa 3% do que é produzido no País. Esse cenário tem conduzido os principais programas de melhoramento genético do feijoeiro no país a priorizar o desenvolvimento de linhagens dos grupos comerciais carioca e preto (Barili *et al.*, 2016; Capanema *et al.*, 2019; Lemos, 2020).

Os feijões especiais são caracterizados por apresentarem grãos com tegumento de coloração variada, como branco, vermelho, creme, amarelo, entre outras tonalidades,

podendo ainda apresentar estrias (rajas) em diferentes intensidades (Blair *et al.*, 2010; Alves *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 2022). Vale ressaltar que esses grãos possuem tamanho médio a grande, com massa de 100 grãos geralmente superior a 40 gramas. Apesar da crescente demanda nacional e internacional, a produção de feijões especiais no Brasil ainda é incipiente, em grande parte devido à escassez de cultivares adaptadas e com elevado potencial produtivo (Blair *et al.*, 2010; Pereira *et al.*, 2014; Ribeiro *et al.*, 2023). Atualmente, das 281 cultivares de feijoeiro-comum registradas no país, apenas 17 pertencem ao grupo de grãos especiais destinados à exportação (Mapa, 2024). Essa limitação reflete o número ainda reduzido de programas de melhoramento genético voltados ao desenvolvimento específico desse tipo de feijão no Brasil.

Apesar de pouco explorado no Brasil, os feijões especiais tem apresentado valores por saca superiores aos outros feijões dos outros grupos comerciais mais consumidos no País. Além disso, os feijões especiais são os mais consumidos internacionalmente, em especial nos países americanos, asiáticos e africanos. Assim, observa-se grande potencial dos feijões especiais como uma alternativa para os produtores que visam produzir feijão para fins de exportação (Cavalcante *et al.*, 2021). O sucesso dessa ação é dependente da disponibilidade de cultivares de feijões especiais que atendam as demandas tanto, o mercado interno como também internacional.

Os programas de melhoramento do feijoeiro têm obtido sucesso na recomendação de cultivares, em especial de feijões carioca e preto. Exemplos de sucesso são as cultivares BRSMG Amuleto, BRSMG Zape, BRSMG Uai, BRS Estilo, BRS FC 403, BRS Esteio, IPR Tuiuiú, dentre outras (Melo *et al.*, 2010; Ramalho *et al.*, 2016; MAPA, 2021; EMBRAPA, 2023). Apesar de poucas, destaca-se as cultivares de feijões especiais: BRSMG Realce, IAC Nuance, IPR Cardeal, BRS 305, BRS FS 311, BRS FS 308 (MAPA, 2021; Pereira *et al.*, 2022; Braz *et al.*, 2022; de FARIA *et al.*, 2019; IAPAR, 2023). O desenvolvimento de novas linhagens superiores de feijões especiais não é tarefa simples, uma vez que a maioria dos caracteres de importância são quantitativos, apresentam baixas herdabilidades, são influenciados pela interação genótipos por ambientes e podem ser de difícil mensuração.

Uma etapa necessária para o sucesso dos programas de melhoramento do feijoeiro é a caracterização fenotípica das cultivares e linhagens presentes nos bancos de germoplasma quanto a caracteres como produtividade de grãos, arquitetura de plantas, severidade das principais doenças e aspecto dos grãos. Além disso, o conhecimento do

comportamento dessas linhagens quando avaliadas em diferentes safras se torna importante em um cenário que visa recomendar cultivares para as diferentes condições observadas nas três safras de cultivo do feijoeiro. Quando se trata dos feijões especiais, que apresentam uma ampla variação quanto aos caracteres dos grãos, torna-se ainda necessário uma caracterização detalhada desses caracteres. Assim, todas essas informações serão úteis aos programas de melhoramento, em especial na seleção de genitores.

A avaliação visual da cor, do formato e do tamanho dos grãos de feijão ainda é a principal metodologia empregada pelos programas de melhoramento genético, com o objetivo de selecionar linhagens ou progênies que apresentem fenótipos desejados pelo mercado consumidor (Rocha *et al.*, 2019; Martins *et al.*, 2023). Essa abordagem exige uma equipe avaliadora experiente para assegurar maior precisão nas avaliações. Além disso, esse processo é moroso e demanda tempo, especialmente quando se avalia um grande número de progênies ou linhagens (Mambrin *et al.*, 2015; Kläsener *et al.*, 2022). Além dessa metodologia, outra técnica relatada na literatura para avaliar caracteres dessa natureza é a utilização de equipamentos como paquímetro e colorímetro. Essas avaliações tem demonstrado maior precisão experimental e acurácia em comparação às avaliações visuais. Entretanto, essas são mais trabalhosas, exigem maior tempo, o que, consequentemente, limita sua aplicação em avaliações de maior número de amostras (Mambrin *et al.*, 2015; Ribeiro *et al.*, 2021).

Resultados promissores sobre aplicação de análises de imagens para avaliar caracteres associados aos grãos de feijão (Silva *et al.*, 2024; Cardoso, 2022; Gomes, 2025) tem sido reportado na literatura. Silva *et al.* (2024) evidenciaram que a precisão na avaliação da cor e do escurecimento dos grãos de feijão carioca por meio de imagens digitais foi aproximadamente três vezes superior à obtida nas avaliações visuais. Resultado similar foi observado por Gomes (2025) ao empregar imagens para avaliar a cor de grãos de feijões vermelhos. Além disso, Cardoso (2022) verificou que a avaliação por imagens do tamanho dos grãos de feijão tem precisão similar à realizada com paquímetro. Todos esses autores ainda destacam que o emprego de imagens permite realizar avaliações mais rápidas e permitem mensurar novos caracteres dos grãos como área e perímetro, que são impossíveis de serem obtidos pelos métodos tradicionais de avaliação dos grãos de feijão. Assim, a análise de imagens tem

demonstrado ser uma ferramenta útil para realizar uma caracterização detalhada de linhagens de feijão quanto aos caracteres dos grãos.

Aliada a avaliação dos grãos, torna-se necessário também o conhecimento do desempenho das linhagens e cultivares de feijões especiais quanto a caracteres agronômicos como produtividade e arquitetura de plantas em uma ou mais condições ambientais. Informações como estas auxiliam os programas de melhoramento na escolha correta de possíveis genitores. A escolha estratégica dos genitores e a orientação adequada dos cruzamentos constituem uma etapa crucial para o sucesso de qualquer programa de melhoramento do feijoeiro baseado na hibridação (Borém *et al.*, 2021; Tavares *et al.*, 2018; Guidoti *et al.*, 2018). Seleção de genitores baseados no desempenho per se, na diversidade genética e no parentesco entre linhagens são algumas estratégias possíveis de serem adotadas pelos programas de melhoramento.

Ainda não se dispõe de informações detalhadas sobre o desempenho per se de linhagens e cultivares de feijões especiais em diferentes condições ambientais tanto para caracteres dos grãos quanto agronômicos. Essas informações também não têm sido utilizadas tanto para escolher genitores como para orientar cruzamentos. Assim, no capítulo 1 intitulado “Caracterização fenotípica de linhagens de feijão-comum de grãos especiais quanto a caracteres dos grãos” foi realizada a caracterização de linhagens de feijões especiais do banco de germoplasma do programa de melhoramento do feijoeiro da UFLA quanto a caracteres dos grãos com auxílio de ferramenta de análise de imagens. Enquanto que no Capítulo 2 intitulado “Análise de fatores como estratégia na seleção de genitores e orientação de cruzamentos no melhoramento de feijão” foi desenvolvido um trabalho de avaliação de linhagens em diferentes condições ambientais e utilização dessas informações para orientar cruzamentos.

REFERÊNCIAS

- Akond, A. G. M., Crawford, H., Berthold, J., Talukder, Z. I., & Hossain, K. (2011). **Minerals (Zn, Fe, Ca, and Mg) and antinutrient (phytic acid) constituents in common bean.** *American journal of food technology*, 6(3), 235.
- Alves, M. V., Filla, V. A., Coelho, A. P., Leal, F. T., Bettiol, J. V. T., & Lemos, L. B. (2020). **Desempenho agrônomo e qualitativo de cultivares de feijoeiro dos grupos comerciais carioca e especial na época de inverno.** *Revista de la Facultad de Agronomía*, 119(1), 15.
- Barili, L. D., Vale, N. M., Moura, L. M., Paula, R. G., Silva, F. F., & Carneiro, J. E. S. (2016). **Genetic progress resulting from forty-three years of breeding of the carioca common bean in Brazil.** *Genetics and Molecular Research*, 15(3), 1-11.
- Blair, M. W. (2013). **Mineral biofortification strategies for food staples: the example of common bean.** *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(35), 8287-8294.
- Blair, M. W., Medina, J. I., Astudillo, C., Rengifo, J., Beebe, S. E., Machado, G., & Graham, R. (2010). **QTL for seed iron and zinc concentration and content in a Mesoamerican common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) population.** *Theoretical and Applied Genetics*, 121, 1059-1070.
- Borém, A., Miranda, G. V., & Fritsche-Neto, R. (2021). **Melhoramento de plantas.** — ISBN: 9788572695671 8. Ed. Viçosa. MG: Editora UFV. 2017. 113 p.
- Braz, A.; De Faria, J. C.; De Souza Filho, B. F.; De Souza, T. L. P. O.; Wendland, A.; De Faria, L. C.; ... & Abreu, A. (2022). **BRS FS311: cultivar de feijoeiro-comum de grãos rajados, com alta produtividade e qualidade comercial.**
- Capanema, L. M., Chiorato, A. F., Carbonell, S. A. M., & Fredo, C. E. (2019). **P&D e inovação com feijão: O caso do Instituto Agrônomo (IAC) [R&D and innovation in the common bean culture: The case of the Agronomic Institute (IAC)].**
- Cardoso, E. S. **Análise de imagens na fenotipagem do tamanho e forma de grãos de cultivares de feijoeiro** [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, 2022].
- Carneiro, J. E. S.; Paula Júnior, T. J.; Borém, A. **Feijão do plantio à colheita.** Viçosa-MG: Editora UFV, 384 p., 2014.
- Cavalcante, A. G., Lemos, L. B., Meirelles, F. C., Filla, V. A., Cavalcante, A. C. P., & de Aquino, L. A. (2021). **Agronomic and qualitative performance of some special grain bean cultivars.** *Australian Journal of Crop Science*, 15(7), 990-996.
- Conab, C. N. D. A. (2023). **Acompanhamento da safra brasileira de café.** CONAB: Brasília, Brazil, 10.
- De Faria, J. C.; De Souza, T. L. P. O.; De Faria, L. C.; De Almeida, V. M.; Da Costa, J. G. C.; Marangon, M.; . & Abreu, A. (2022). **BRS FS308: cultivar de feijoeiro-comum com grãos light red kidney para exportação.**

de Oliveira Tavares, T. C., de Sousa, S. A., Lopes, M. B. S., Veloso, D. A., & Fidelis, R. R. (2018). **Divergência genética entre cultivares de feijão comum cultivados no estado do Tocantins**. *Revista de Agricultura Neotropical*, 5(3), 76-82.

EMBRAPA. Socioeconomia. **Embrapa Arroz e Feijão, 2023**. Acesso em: 17 dez. 2024.

EMBRAPA. Dados conjunturais da produção de feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) e caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) no Brasil (1985 a 2020). **Embrapa Arroz e Feijão, 2023**. Acesso em: 16 set. 2023.

Gomes, D. A. **Otimizações na fenotipagem por imagem de linhagens de feijão comum quanto ao tamanho e cor de sementes**. [Tese de Doutorado, Universidade Federal de Lavras, 2025].

Guimarães, E.; De Souza, T. L. O.; De Souza, T. L. P. O. (2019). **Feijão comum: o uso de sementes certificadas na cadeia produtiva**.

Guidoti, D. T., Gonela, A., Vidigal, M. C. G., Conrado, T. V., & Romani, I. (2018). **Interrelação entre características morfológicas, agronômicas e moleculares na análise de diversidade genética em feijão comum**. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 40, e33032.

Holtz, V., Sokolowski, K. J. O., de Alencar, R. G., Jardim, C. C. S., Massola, M. P., & Oliveira, D. G. (2019). **Perdas na colheita mecanizada direta de feijão cultivado em área irrigada por pivô central**. *Revista Agroecologia-Agrotec*, 10(1), 10-19.

Hummel, M., Hallahan, B. F., Brychkova, G., Ramirez-Villegas, J., Guwela, V., Chataika, B., & Spillane, C. (2018). **Reduction in nutritional quality and growing area suitability of common bean under climate change induced drought stress in Africa**. *Scientific Reports*, 8(1), 16187.

IAPAR. **Feijão preto IPR URUTAU**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://www.idrparana.pr.gov.br/system/files/publico/negocios/folders/feijao/IPR-Urutau.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2023.

Kläsener, G. R., Ribeiro, N. D., & Argenta, H. S. (2022). **Genetic divergence and selection of bean 1222 cultivars of different grain types based on physical traits**. *Revista Ciência Agronômica*, 53, 1223 e20217820.

Lemos, R. C.; Abreu, A. F. B.; Souza, E. A.; Santos, J. B.; Ramalho, M. A. P. (2020). **A half century of a bean breeding program in the South and Alto Paranaíba regions of Minas Gerais**. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 20(2), e295420211. Brazilian Society of Plant Breeding.

Mambrin, R. B., Ribeiro, N. D., Henning, L. M. M., Henning, F. A., & Barkert, K. A. (2015). **Seleção de linhagens de feijão com base no padrão e na qualidade de sementes**. *Revista Caatinga*, 28(03), 147-156.

MAPA. **Quatro novas cultivares de feijão para Minas Gerais são recomendadas pela Epamig, UFV, UFLA e Embrapa.** Disponível em:

<<http://www.agricultura.mg.gov.br/index.php/noticias-ci/story/4603-quatro-novas-cultivares-de-feijao-para-minas-gerais-sao-recomendadas-pela-epamig-ufv-ufla-e-embrapa?layout=print>>.

Mapa - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2024). **Registro Nacional de cultivares.** Disponível em: <

http://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php>.

Martins, S. M., Bittencourt, C. D., Melo, L. C., Aguiar, M. S., Almeida, V. M. D., Souza, T. L. P., & Pereira, H. S. (2023). **Genetic parameters and selection of common bean lines with high nutritional and agronomic quality.** *Crop Science*, 63(1), 128-138.

Mendoza, F. A., Kelly, J. D., & Cichy, K. A. (2017). **Automated prediction of sensory scores for color and appearance in canned black beans (*Phaseolus vulgaris* L.) using machine vision.** *International Journal of Food Properties*, 20(1), 83-99.

Melo, L. C., Peloso, M. J. D., Pereira, H. S., Faria, L. C. D., Costa, J. G. C. D., Díaz, J. L. C., ... & Abreu, Â. D. F. B. (2010). **BRS Estilo: common bean cultivar with Carioca grain, upright growth, and high yield potential.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 10, 377-379.

Nadeem, M. A., Yeken, M. Z., Shahid, M. Q., Habyarimana, E., Yılmaz, H., Alsaleh, A., & Baloch, F. S. (2021). **Common bean as a potential crop for future food security: an overview of past, current, and future contributions in genomics, transcriptomics, transgenics, and proteomics.** *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 35(1), 759-787.

Pereira HS et al. (2022) **BRS FS308: cultivar de feijoeiro-comum com grãos light red kidney para exportação.** Embrapa Arroz e Feijão, Comunicado técnico, 7p.

Pereira, H. S., Bueno, L. G., Del Peloso, M. J., Abreu, A. D. F. B., Moreira, J. A. A., Martins, M., ... & Melo, L. C. (2014). **Agronomic performance and stability of andean common bean lines with white grains in Brazil.** *Bragantia*, 73, 130-137.

Ramalho, M. A. P., Abreu, Â. D. F. B., Carneiro, J. E. D. S., Melo, L. C., Paula, T. J. D., Pereira, H. S., & Vieira, R. F. (2016). **BRSMG Uai: common bean cultivar with carioca grain type and upright plant architecture.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 16(3), 261-264.

Ramírez-Jiménez, A. K., Gaytán-Martínez, M., Morales-Sánchez, E., & Loarca-Pina, G. (2018). **Functional properties and sensory value of snack bars added with common bean flour as a source of bioactive compounds.** *LWT*, 89, 674-680.

Ribeiro, N. D., Maziero, S. M., & Argenta, H. D. S. (2023). **Genetic gain for technological traits in new cultivars developed by the Southern Brazilian common-**

bean network. *Ciência e Agrotecnologia*, 47, e019322.

Ribeiro, N. D., Mezzomo, H. C., & Kläsener, G. R. (2021). **Genetic parameters and selection of micromineral-biofortified Andean bean lines with high technological quality.** *Semina: Ciências Agrárias*, 42(2), 517-538.

Rocha, J. R. A. S. D. C., Nunes, K. V., Carneiro, A. L. N., Marçal, T. D. S., Salvador, F. V., Carneiro, 1301 P. C. S., & Carneiro, J. E. S. (2019). **Selection of superior inbred progenies to ward the common 1302 bean ideotype.** *Agronomy Journal*, 111(3), 1181-1189.

Silva, L. C. D., da Silva Cardoso, E., Mencilha, J., Gomes, D. A., de Castro Miguel, J. A., Cardoso, J. V. C., ... & Carneiro, V. Q. (2024). **Computer vision for assessment the seed coat color of carioca common beans.** *Agronomy Journal*, 116(5), 2141-2150.

Tavares, T., Sousa, S., Salgados, F., Santos, G., Lopes, M., & Fidelis, R. (2017). **Adaptabilidade e estabilidade da produção de grão em feijão comum (*Phaseolus vulgaris*).** *Revista de ciências agrárias*, 40(2), 411-418.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

**ARTIGO 1– CARACTERIZAÇÃO FENOTÍPICA DE GRÃOS DE LINHAGENS
DE FEIJÃO ESPECIAL POR MEIO DE ANÁLISE DE IMAGEM DIGITAL**

Artigo redigido conforme as normas da revista Crop Science- Versão preliminar	
Título do artigo:	Caracterização fenotípica de grãos de linhagens de feijão especial por meio de análise de imagem digital
Autores:	José Eulário Lampi Dique
	Constantino Rico Raimundo Artur
	Jussara Mencalha
	Rafaela Pereira Carvalho
	Lucimara Cruz de Souza
	Christiane Augusto Diniz Melo
	Vinícius Quintão Carneiro
Periódico:	Crop Science Society of América
ISSN	
DOI	

Artigo1 - Caracterização fenotípica de grãos de linhagens de feijão especial por meio de análise de imagem digital

Resumo

Atributos como cor, tamanho e formato dos grãos de feijão-comum do grupo especial são altamente valorizados por consumidores e pela indústria alimentícia. Este estudo teve como objetivo caracterizar 68 linhagens de feijões de grãos especiais, além de uma testemunha de feijão comercial do grupo preto (VP22), com base nesses atributos, por meio de análise de imagens. Para avaliação dessas linhagens foram conduzidos dois experimentos nas safras da seca e outono-inverno de 2021, em Lavras (MG), em delineamento em blocos casualizados com três repetições. Essas linhagens foram avaliadas quanto a comprimento (CP), largura (LG), área (AR), coeficiente J e para características relacionadas à cor como as modas dos canais L*, a* e b* do sistema de cores CIE Lab. A mensuração dessas características foi realizada a partir de uma imagem de 100 grãos de cada parcela de cada experimento. As imagens foram capturadas em estúdio fotográfico padronizado e processadas digitalmente. Os dados foram submetidos a análises individuais e conjunta de variância. A interação linhagens por safras para todos os caracteres de tamanho, formato e cor dos grãos foi de natureza simples, demonstrando que o ranqueamento das linhagens para todos os caracteres foi similar nas duas safras avaliadas. As linhagens apresentaram diferenças quanto aos caracteres relacionados ao tamanho dos grãos como comprimento, largura, área e coeficiente J. Isso também foi observado para os caracteres relacionados à cor dos grãos, como a moda nos canais L*, a* e b* dos sistemas de cores CIE Lab. Linhagens de alguns grupos comerciais apresentaram um padrão comum de formato dos grãos enquanto outras já apresentaram variação no formato. Já para os caracteres comprimento, largura e área, houve grande variação entre as linhagens dentro de cada grupo comercial.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L.; feijões andinos; análise de imagens; aspecto dos grãos.

Article 1 - Phenotypic characterization of grains from special bean lines using digital image analysis

Abstract

Attributes such as color, size, and shape of common bean grains from the specialty group are highly valued by consumers and the food industry. This study aimed to characterize 68 specialty grain bean lines, along with one commercial black bean check (VP22), based on these attributes through image analysis. To evaluate these lines, two experiments were conducted during the dry and autumn-winter seasons of 2021, in Lavras (MG), using a randomized complete block design with three replications. The lines were evaluated for grain length (CP), width (LG), area (AR), J coefficient, and for color-related traits such as the modes of the L, a, and b* channels of the CIE Lab color system. Measurements of these traits were obtained from images of 100 grains per plot in each experiment. The images were captured in a standardized photographic studio and digitally processed. The data were subjected to individual and combined analysis of variance. The genotype-by-season interaction for all grain size, shape, and color traits was simple, indicating that the ranking of the lines for all traits was consistent across both seasons. The lines showed differences in grain size traits such as length, width, area, and J coefficient. Similar variability was observed for color-related traits, including the mode values in the L, a, and b* channels of the CIE Lab color space. Lines from certain commercial groups displayed a consistent grain shape pattern, while others exhibited variation in shape. Regarding length, width, and area, there was considerable variation among lines within each commercial group.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L.; Andean beans; image analysis; grain appearance.

1. INTRODUÇÃO

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) apresenta uma grande variação para tamanho, formato e cor dos grãos. Essas são as principais particularidades que diferenciam os feijões dos dois principais centros de origem da espécie: mesoamericano e andino. Os feijões de origem mesoamericana apresentam grãos pequenos (massa de 100 grãos inferior a 25 gramas) e médios (massa de 100 grãos entre 25 e 40 gramas) (Ramalho; Abreu, 2015; EMBRAPA, 2024; CONAB, 2024). Os grupos comerciais carioca, preto, vermelho, rosinha e roxo são os principais representantes dos feijões de origem mesoamericana. Já os feijões de origem andina são caracterizados por apresentarem grãos grandes com massa de 100 grãos superior a 40 gramas (Blair, 2010; Pereira *et al.*, 2014; Pereira *et al.*, 2022). Existe uma grande variação de cor nos feijões andinos como por exemplo brancos, vermelhos, amarelos e creme. Alguns desses podem apresentar listras (rajas) com diferentes cores. Essas são particularidades que definem os principais grupos representantes de origem andina: cranberry (rajados), calima, jalo, mulatinho, roxo, vermelho e branco. Os feijões de todos esses grupos são conhecidos como feijões de grãos especiais, que por possuírem demanda internacional podem ser denominados como feijões do tipo exportação (Blair *et al.*, 2010; Carneiro *et al.*, 2014; Cavalcante *et al.*, 2021; Carbonel *et al.*, 2020; Klasener *et al.*, 2020; Pereira *et al.*, 202; Ribeiro *et al.*, 2023).

Os feijões de grãos especiais representam somente 3% da produção nacional do Brasil (EMBRAPA, 2024). Isso ocorre devido à baixa demanda desses feijões no País, no qual a produção e o consumo é maior dos feijões mesoamericanos dos grupos comerciais carioca e preto (Barili *et al.* 2016, Lemos *et al.* 2020; Capanema *et al.*, 2019). Apesar disso, os feijões especiais apresentam valores mais elevados no mercado, especialmente em feiras. O cultivo desses feijões tem aumentado no Brasil, impulsionado pelo valor comercial e pela demanda internacional, especialmente da Europa e da África (Cavalcante *et al.*, 2021; CONAB, 2023; EMBRAPA, 2024). Assim, destaca-se a importância dos programas de melhoramento do feijoeiro com ênfase nos grãos especiais para fornecer novas cultivares para atender tanto o mercado nacional quanto internacional. Entretanto, ainda são poucos os programas de melhoramento com foco nesses feijões que estão consolidados. Resultado disso é o pequeno número de cultivares de feijões de grãos especiais recomendadas no Brasil (Cavalcante *et al.*, 2021; de Faria *et al.*, 2022).

A caracterização do germoplasma disponível de feijões especiais é de grande importância para os programas de melhoramento que visam consolidar a recomendação de novas cultivares desse grupo. As informações geradas por meio dessa caracterização são de grande utilidade tanto para estudos genéticos como para orientar os programas de melhoramento, especialmente na etapa de realização de cruzamentos. Essa caracterização pode envolver caracteres de importância como produtividade de grãos, arquitetura de plantas, resistência a doenças como também caracteres associados a qualidade comercial dos grãos (Schmitz *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2024). Os caracteres associados aos grãos são determinantes na aceitação de uma nova cultivar, que deve atender as demandas dos produtores, da indústria e do mercado consumidor (Klasener *et al.*, 2020; Ribeiro *et al.*, 2021 Arruda *et al.*, 2024).

A caracterização de linhagens de feijões especiais quanto aos caracteres dos grãos demonstra-se importante uma vez que nesse grupo existe uma grande variação de cores, tamanhos e formatos, de modo que essa variação pode ser explorada em cruzamentos de formas distintas, conforme a demanda do mercado. Essa caracterização tem sido pouco explorada devido à dificuldade na obtenção de mensurações como comprimento, largura e coeficiente J assim como de medidas de cor dos grãos (Baek *et al.*, 2020; Yang *et al.* 2021; Abud *et al.*, 2022). Para obtenção de dados físicos dos grãos tem sido empregados paquímetros, que apesar de propiciar medidas precisas demandam grande quantidade de tempo para realizar as avaliações. Por esse motivo, esse modo de avaliação tem sido realizado com pequenas amostras de um pequeno número de tratamentos (Mambrin *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2016; Klasener *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2021; Cardoso, 2022). O mesmo é observado quanto aos caracteres de cor dos grãos, quando avaliados com colorímetro.

As avaliações por imagens de tamanho, formato e cor dos grãos na cultura do feijoeiro tem proporcionado maior automação, rapidez e precisão nas mensurações se comparado com as avaliações tradições para esses caracteres (Rego, 2020; Yang *et al.*, 2021). Além disso, essa abordagem permite mensurar outros caracteres que são impossíveis com as metodologias atuais como por exemplo a área dos grãos (Abud *et al.*, 2022). Apesar dessas vantagens, ainda são escassos os trabalhos que empregam essa abordagem para caracterização de linhagens de feijão quanto a caracteres dos grãos, especialmente daquelas do grupo especial. A ampliação de estudos com feijões de grãos

especiais pode representar um avanço significativo, ao orientar futuras pesquisas e estratégias de melhoramento. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo aplicar técnicas de análise de imagens para caracterizar linhagens de feijões de grãos especiais quanto ao tamanho, formato e cor dos grãos, avaliadas em diferentes safras.

2. MATERIAL E MÉTODO

2.1 Avaliação por imagem dos caracteres físicos e de cor dos grãos

Um total de 68 linhagens de feijões de grãos especiais e a linhagem VP 22 (feijão preto) de origem mesoamericana (Tabela S1), pertencentes ao banco de germoplasma do Programa de Genética e Melhoramento do Feijoeiro da Universidade Federal de Lavras (UFLA), foram avaliadas quanto a características físicas e de cor dos grãos. Os grãos utilizados nas avaliações foram provenientes de experimentos conduzidos em delineamento de blocos casualizados com três repetições nas safras da seca e de outono-inverno de 2021 no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária da Universidade Federal de Lavras (CDCTA-UFLA), localizado no município de Lavras (21°58' de latitude Sul, 42°22' de longitude Oeste e 918 metros de altitude) em Minas Gerais. As parcelas experimentais foram compostas por duas linhas de dois metros, espaçadas de 0,6 metros e densidade de plantio de 15 sementes por metro.

Uma amostra aleatória contendo 100 grãos foi retirada de cada parcela dos experimentos para captura de imagens e, posterior, mensuração de caracteres físicos e de cor dos grãos (Figura 1A). A captura das imagens foi realizada por meio de um sistema computacional, em um estúdio fotográfico (Figura 1B) equipado com uma fonte de iluminação constante e uniforme, utilizando uma câmera profissional Canon EOS 60D, configurada manualmente com ISO 200, abertura do diafragma f/10 e velocidade do obturador de 1/20s. Esses procedimentos foram realizados no Laboratório de Fenômica do Departamento de Biologia da Universidade Federal de Lavras (UFLA).



Figura 1-(A) Imagem capturada dá uma amostra de 100 grãos de uma parcela de feijão de grãos especiais; (B) estúdio fotográfico do laboratório de Fenômica da UFLA utilizado na captura das imagens.

As imagens capturadas de cada parcela foram submetidas a um processo de segmentação com o objetivo de isolar exclusivamente a região ocupada pelos grãos e eliminar o fundo da imagem. Inicialmente, as imagens foram obtidas no sistema de cores RGB (canais vermelhos - R, verde - G e azul - B) e, posteriormente, convertidas para o espaço de cor CIELAB (Lab*), representado pelos componentes de luminosidade (L^*), eixo verde-vermelho (a^*) e eixo azul-amarelo (b^*), com o intuito de facilitar o processo de segmentação. A matriz da imagem correspondente ao canal b^* foi utilizada como base para a aplicação da técnica de segmentação por limiarização proposta por Otsu (1975). O objetivo desse método foi determinar o valor de limiar que minimizasse a soma das variâncias intraclasse dos pixels da imagem, promovendo uma separação eficiente entre os pixels correspondentes aos grãos e ao fundo.

Uma vez individualizados os grãos de cada parcela, foram realizadas as mensurações de características físicas dos grãos como comprimento (CP), largura (LG), coeficiente J (razão entre comprimento e largura) e área (AR). O comprimento e a largura foram mensurados em centímetros (cm) e a área em cm^2 . Também foram mensuradas características de cor como as modas dos pixels dos grãos nos canais L^* (MoL), a^* (Moa) e b^* (Mob) do espaço de cor CIELAB. As médias dos 100 grãos de cada imagem para cada um desses caracteres foram utilizadas para representar cada parcela do experimento. Todo o processamento das imagens foi realizado com o auxílio das bibliotecas OpenCV (Howse, 2013) e Scikit-Image (van der Walt et al., 2014), utilizando a linguagem de programação Python (Van Rossum *et al.*, 2014).

2.2 Análises Estatísticas

Os dados provenientes das avaliações das linhagens quanto às características mensuradas foram submetidos às análises individuais e conjunta de variância. As análises individuais de variância foram realizadas conforme o modelo estatístico:

$$y_{ij} = \mu + l_i + b_j + e_{ij},$$

em que: y_{ij} é a observação da i -ésima linhagem no j -ésimo do bloco; μ é o intercepto; l_i é o efeito fixo de linhagem; b_j é o efeito aleatório de bloco, com $b_j \sim \text{NIID}(0, \sigma_b^2)$; e_{ij} é o erro aleatório que incide sobre a i -ésima linhagem no j -ésimo bloco, com $e_{ij} \sim \text{NIID}(0, \sigma_e^2)$.

A acurácia seletiva (r_{gg}) foi estimada conforme Resende & Duarte (2007), por meio da seguinte equação: $r_{gg} = \sqrt{1 - \frac{1}{F}}$, em que F (Snedecor) é o valor da razão entre as variâncias do efeito de linhagens e residual da análise individual de variância. O coeficiente de variação experimental (CV%) foi obtido por meio da equação: $CV = 100 \times \frac{\sqrt{QMR}}{\bar{S}}$, em que QMR é o quadrado médio do resíduo e $\bar{S}$ é a média da característica avaliada no experimento.

As análises conjuntas de variância foram realizadas conforme o modelo descrito na equação:

$$y_{ijk} = \mu + b_{j(k)} + l_i + a_k + (la)_{ik} + e_{ijk},$$

em que, y_{ijk} é o valor observado na parcela que recebeu a linhagem i no bloco j dentro do ambiente k ; μ é o intercepto; l_i é o efeito fixo de linhagem; $b_{j(k)}$ é efeito aleatório do bloco j dentro do ambiente k , com $b_{j(k)} \sim \text{NIID}(0, \sigma_b^2)$; a_k é o efeito fixo do ambiente k ; $(la)_{ik}$ é o efeito fixo da interação linhagens por ambientes; e_{ijk} é o erro aleatório que incide sobre cada linhagem i nos j blocos dos k ambientes, com $e_{ijk} \sim \text{NIID}(0, \sigma_e^2)$.

Uma vez detectada a presença de interação significativa de linhagens por ambiente, foi realizado estudo para identificar a natureza da interação linhagens por pares de ambientes. Para isso foi estimada a correlação de Pearson (r), entre as médias das linhagens para cada característica no par de safras. O porcentual da parte complexa (PC) desta interação foi obtido por meio da metodologia proposta por Cruz & Castoldi (1991) conforme a seguinte equação: $PC = \sqrt{(1 - r)^3 Q_1 Q_2}$, em que Q_1 e Q_2 referem-se aos quadrados médios de linhagens nas análises individuais de cada característica e r é a correlação de Pearson entre as médias das linhagens nos dois ambientes.

Uma vez observada interação de linhagens por ambientes de natureza simples foi realizado o agrupamento das médias das linhagens considerando as duas safras conjuntamente (Scott-Knott, 1974). Todas as análises estatísticas foram feitas com o auxílio dos recursos computacionais do software GENES (Cruz, 2016).

3. RESULTADOS

O efeito de linhagens foi significativo ($p < 0,01$) nas análises individuais de variância para todas as características avaliadas nas duas safras (Tabela 1). Portanto, em cada uma dessas observou-se que pelo menos uma das linhagens apresentou média diferente das demais para cada uma das características. As médias do CP dos grãos das linhagens nos experimentos conduzidos nas safras da seca e de outono-inverno de 2021 foram de 1,80 e 1,44 cm, e para LG dos grãos foram de 0,98 e 0,78 cm, respectivamente (Tabela 1). As médias do coeficiente J em ambos os experimentos foram iguais a 1,84 cm. Já as médias de AR dos grãos foram de 1,35 e 0,85 cm², respectivamente. Nesses experimentos, as médias de MoL foram de 120,63 e 114, respectivamente. Já as médias de Moa foram de 143,83 e 135 e de 134,35 e 135 para Mob, respectivamente. (Tabela 1).

Tabela 1 – Resumo das análises individuais de variância, referentes à avaliação dos grãos de 69 linhagens de feijão-comum quanto a comprimento (CP), largura (LG), coeficiente (J), área (AR), modas dos canais L*, a* e b* (MoL, Moa e Mob), avaliadas nas safras da seca e do outono-inverno de 2021.

¹ CAR	Safra da seca					Safra de outono-Inverno				
	² QML	³ QME	⁴ CV(%)	⁵ $\hat{r}_{gg}$	Med	² QML	³ QME	⁴ CV(%)	⁵ $\hat{r}_{gg}$	⁶ Med
CP	0,117**	0,003	3,11	0,98	1,80	0,060**	0,001	2,31	0,99	1,44
LG	0,012**	0,006	2,56	0,97	0,98	0,007**	0,0003	2,18	0,97	0,78
J	0,101**	0,001	1,44	0,99	1,84	0,092**	0,001	1,25	0,99	1,84
AR	0,121**	0,006	5,51	0,97	1,35	0,039**	0,001	4,35	0,98	0,85
MoL	14228,052**	47,149	5,69	0,99	120,63	8966,801**	19,011	3,83	0,99	114
Moa	280,249**	2,491	1,09	0,99	143,83	132,482**	0,832	0,69	0,99	135
Mob	129,517**	1,392	0,87	0,99	134,35	141,79**	0,897	0,71	0,99	135

** :Significativo pelo teste F ao nível de 1% de probabilidade; ¹CAR: Caráter; ²QML: quadrado médio de linhagens; ³QME: quadrado médio do erro; ⁴CV(%): coeficiente de variação ⁵ $\hat{r}_{gg}$:acurácia; ⁶Med: Médias.

Fonte: O autor (2025)

As estimativas de acurácia foram iguais ou superiores a 0,97 para todos os caracteres nas duas safras (Tabela 1). Já as estimativas de CV foram de 3,11 e 2,31% para CP, de 2,56 e 2,18% para LG, de 1,44 e 1,25% para coeficiente J, de 5,51 e 4,35% para AR, de 5,69 e 3,83% para MoL, de 1,09 e 0,69% para Moa e de 0,87 e 0,71% para Mob, nas safras da seca e outono-inverno, respectivamente.

As interações linhagens por safras (LxS) foram significativas para todas as características (Tabela 2). Entretanto, as estimativas dos coeficientes de correlação de Pearson entre as médias das linhagens nas duas safras foram iguais ou superiores a 0,88 para todos os caracteres, bem como os percentuais da parte complexa (PC) da interação LxS foram iguais ou inferiores a 26,96%, indicando a natureza simples da interação. O efeito de linhagens também foi significativo para todos os caracteres avaliados.

Tabela 2 – Resumo da análise conjunta de variância referentes ao comprimento (CP), largura (LG), coeficiente J (J), área (AR) e modas dos canais L* (MoL), a* (Moa) e b* (Mob) dos grãos de linhagens de feijão avaliadas nas safras da seca e outono-inverno de 2021.

¹ FV	Quadrados Médio							
	⁶ GL	MoL	Moa	Mob	CP	LG	J	AR
² B/S	4	427,34	2,57	2,38	0,003	0,003	0,006	0,012
Lin (L)	68	26964,32**	553,03**	266,50**	0,177**	0,017**	0,190**	0,143**
Saf (S)	1	93,49 ^{ns}	152,39**	54,75**	13,676**	4,019**	0,0001 ^{ns}	25,484**
³ LxS	68	162,83**	8,23**	4,89**	0,0082**	0,001**	0,003**	0,017**
Resíduo	272	38,89	1,90	1,15	0,002	0,001	0,001	0,004
Média		117,32,	139,42	134,68	1,62	0,89	1,84	1,1
⁴ r		0,99	0,97	0,96	0,96	0,88	0,97	0,92
⁵ PC%		9,34	17,13	18,17	8,86	26,96	16,53	9,81

¹FV: Fontes de variação; ²B/S: Blocos dentro de safras; ³LxS: Interação linhagens por safra; ⁴r: Correlação de Pearson entre as medias das linhagens em cada safra; ⁵PC%: Porcentagem da parte complexa da interação LxS; ⁶GL: Graus de liberdade; ** significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns}: não significativo

Fonte: O autor (2025)

As médias das linhagens considerando as duas safras foram distribuídas em 13, 12 e 17 grupos diferentes quanto a MoL, Moa e Mob, respectivamente (Figura 2; Tabela S2). De modo geral, as linhagens do mesmo grupo comercial foram alocadas nos mesmos grupos ou em grupos próximos, conforme Scott Knott (1974), para esses caracteres. As linhagens de grãos brancos foram alocadas no grupo de maior média de MoL (MoL>200), enquanto as linhagens dos grupos cranberry e jalo pertenceram ao

segundo e terceiro grupos de maiores médias (Figura 2A). O segundo grupo apresentou linhagens com médias para MoL entre 171,74 e 182,00 enquanto o terceiro foi composto por aquelas com média entre 161,27 e 169,84. Em ambos os grupos foram observadas linhagens cranberry e jalo. Já as linhagens dos outros 10 grupos apresentaram médias de MoL iguais ou inferiores a 115,51. Dentre esses, os grupos de menores médias de MoL foram compostos por linhagens de feijões pretos ou dark red kidney.

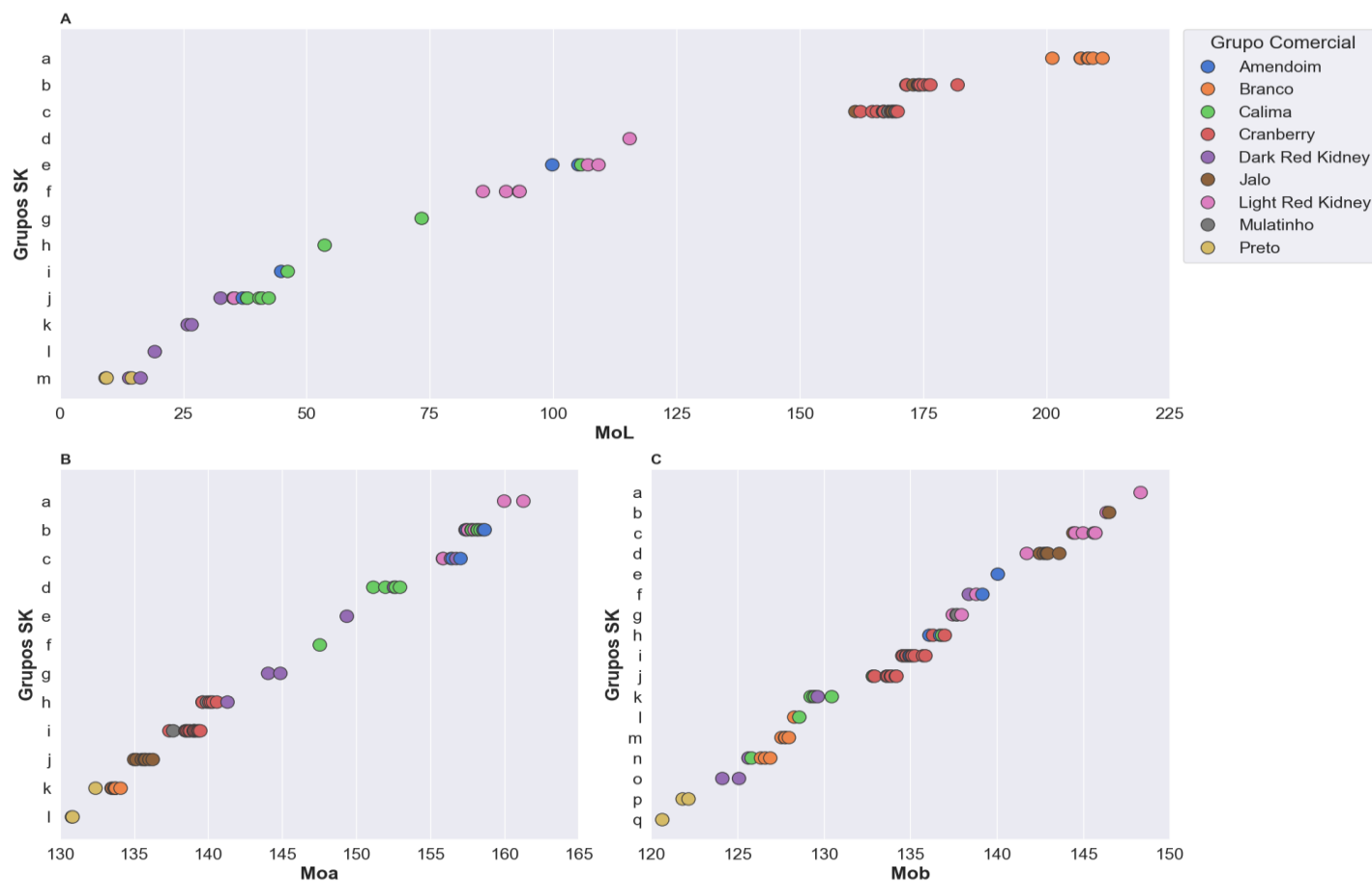


Figura 2- Agrupamento das médias das linhagens de feijões de grãos especial pelo teste de Scott-Knott (1974) ao nível de 5% de probabilidade para as seguintes características: (A) modas dos canais L* (MoL), (B) a* (Moa) e (C) b* (Mob) dos grãos.

A dispersão simultânea das linhagens quanto a cor dos grãos por meio das características Moa e Mob permitiu discriminar a maioria dos grupos comerciais (Figura 3). Os feijões pretos e brancos foram alocados nos grupos de menores médias para ambas as características (Figuras 2B e 2C; Tabela S2). As linhagens do grupo jalo apresentaram grãos com valores baixos para Moa e elevados para Mob. Já as linhagens cranberry foram alocadas nos grupos de menores médias para Moa e de valores intermediários para Mob. Os demais grupos comerciais já demonstraram ter uma variação quanto a cor mais pronunciada como, por exemplo, os feijões dark red kidney que apresentaram valores de Moa entre 141,31 e 156,75 e de Mob entre 124,12 e 138,38. Isso foi evidenciado pelos diferentes grupos do teste de Scott-Knott (1974) em que as linhagens dark red kidney foram alocadas.

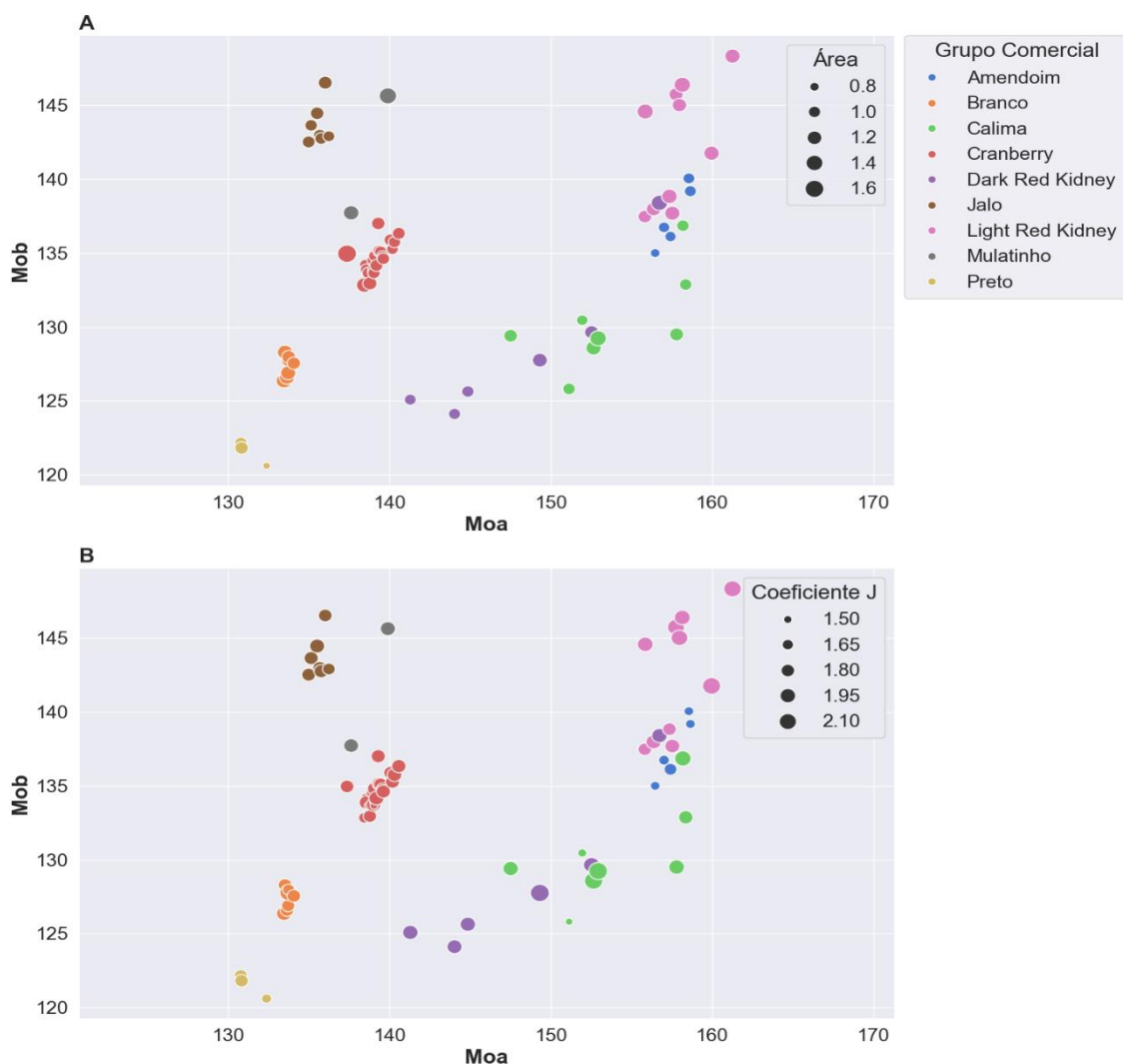


Figura 3- Dispersão das médias das linhagens quanto a cor dos grãos. (A) Dispersão das médias das linhagens quanto às modas nos canais a^* (Moa) e b^* (Mob) e separação dessas por área. (B) Dispersão das médias das linhagens quanto às modas nos canais a^* (Moa) e b^* (Mob) e separação dessas por coeficiente J.

As linhagens foram agrupadas em 11, 9 e 10 grupos quanto CP, LG e AR, respectivamente (Figura 4; Tabela S3). De modo geral, linhagens de diferentes grupos comerciais foram alocadas em diferentes grupos formados. A cultivar BRS Executivo (cranberry) foi a única alocada nos grupos de maiores médias para CP, LG e AR (Tabela S3). Além dessa, a cultivar BRS FS 305 (calima) também foi alocada no grupo de maior CP. Entretanto, essa cultivar foi alocada no quinto e terceiro grupo de maior média para LG e AR, respectivamente. Destaca-se também a cultivar A 195 (mulatinho) por estar presente no segundo grupo de maior CP, LG e AR. As linhagens de grãos tipo amendoim foram alocadas em grupos de menores médias para CP, LG e AR. Além dessas, a testemunha VP 22 (preto) de origem mesoamericana foi a única alocada no grupo de menor média quanto CP, LG e AR.

As linhagens apresentaram grãos com coeficiente J variando entre 1,47 e 2,05 (Figuras 4D e 3B; Tabela S3). Essas foram distribuídas em 20 grupos quanto a esse caráter. Dentre essas, foram classificadas 11, 28, 21 e 9 com grãos de formatos elípticos, oblongos/reniforme curtos, oblongos/reniforme médios e oblongos/reniforme longos, respectivamente (Puerta Romero, 1961). Não foram observadas linhagens com grãos esféricos. À semelhança dos demais caracteres físicos dos grãos, não houve alocação de linhagens de um determinado grupo comercial ser alocada em uma classe específica de formato conforme Puerta Romero (1961) ou grupo do teste de agrupamento (Scott and Knott, 1974) (Tabela 3).

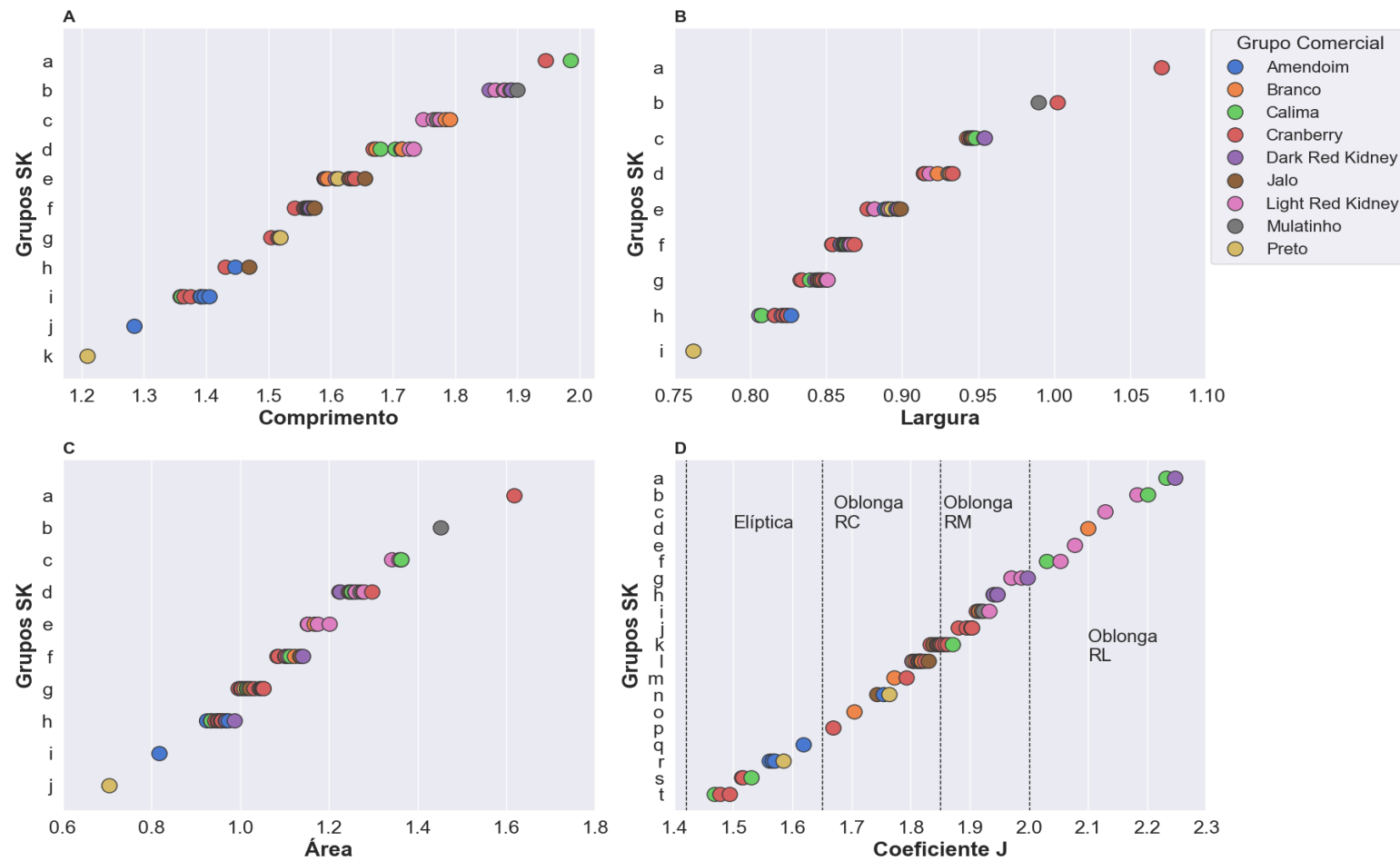


Figura 4 - Agrupamento das médias das linhagens de feijões de grãos especiais pelo teste de Scott-Knott (1974) ao nível de 5% de probabilidade para as seguintes características: (A) comprimento (CP), (B) largura (LG), (C) área (AR) e (D) coeficiente J dos grãos.

A dispersão simultânea das médias das linhagens quanto a CP e LG dos grãos demonstrou que existem linhagens com diferentes combinações de medidas para esses caracteres (Figura 4D e 5A; Tabela S3). Poucas foram as linhagens com elevadas médias para ambos os caracteres de forma simultânea, que conseqüentemente apresentaram grãos com elevada área. Exemplos dessas linhagens são BRS Executivo e A 195, que foram alocadas no primeiro e segundo grupo de maiores médias de AR, respectivamente. Além dessa diferença, a primeira apresentou grãos oblongos/reniforme curtos enquanto que os grãos da segunda foram oblongos/reniforme médio. Também foram observadas linhagens com grãos oblongos/reniforme longos, cujo o comprimento foi aproximadamente duas vezes maior que a largura. Exemplos são as linhagens CF 240114, BRS FC 305, CF 200059, Light Red Kidney, Red Kanner, Ouro Graúdo, CF 250007, CF 250007, BRS FS 308 e CFE 46 (Figura 4D). A maioria dessas são dos grupos light red kidney e calima.

De modo geral, as linhagens com grãos elípticos apresentaram menor área (Figura 5B; Tabela S3). Esse padrão foi observado para a testemunha VP 22 (preto), para linhagens do grupo amendoim (CFE 39, Rainha, CF 240108, CFE 134, Amendoim), do grupo cranberry (Pintado, Cacahuati Bola, Tico Tico, Pintado Bolinha) e do grupo calima (CF 250028). Já as linhagens com formato oblongo possuíram diferentes tamanhos de grãos. Observou-se linhagens com grãos de formato oblongo reniforme curto com área variando de 0,9253 cm² (CF 250032) até 1,6181 cm². Já para aquelas de grãos reniformes médios, a área variou de 0,9692 a 1,4518 cm², enquanto que essa medida para as linhagens de grãos reniformes longos variou de 1,0163 a 1,3634 cm².

As linhagens dentro de cada grupo comercial apresentaram variação quanto a AR, coeficiente J e classificação de formato (Figura 4; Tabela S3). Entretanto, houve uma tendência de cada grupo comercial para esses caracteres. Apesar das linhagens dentro de cada grupo comercial ser alocadas em mais de um grupo, esses grupos de médias demonstraram serem próximos (Figura 4; Tabela S3). As linhagens de grãos amendoim foram as que demonstraram ter menor tamanho com áreas entre 0,82 e 0,97 cm². Já as linhagens dos grupos light red kidney e mulatinho estiveram entre as de maior área. As 10 linhagens do primeiro grupo comercial apresentaram áreas entre 1,11 e 1,36 cm², enquanto os grãos das duas do grupo mulatinho possuíram área de 1,27 (Mateigão Fosco 11) e 1,45 cm² (A 195). Os grãos das linhagens do grupo jalo apresentaram área entre 0,96 e 1,13 cm² e formatos em sua maioria oblongo/reniforme

curto. O grupo comercial branco também apresentou grãos com predomínio desse formato, porém suas áreas variaram de 1,08 a 1,28 cm².

Destaca-se que linhagens cranberry apresentaram grande variação para área com valores entre 0,94 a 1,62 cm², além de também apresentarem grãos com diferentes formatos (Figura 4D e 5B). Os grãos das linhagens do grupo calima também apresentaram diferentes formatos e suas áreas variaram de 0,94 a 1,36. O grupo comercial dark red kidney, apesar de predominar linhagens com grãos oblongos/reniformes médios, também apresentou variação pronunciada para área com valores entre 0,97 a 1,36 cm².

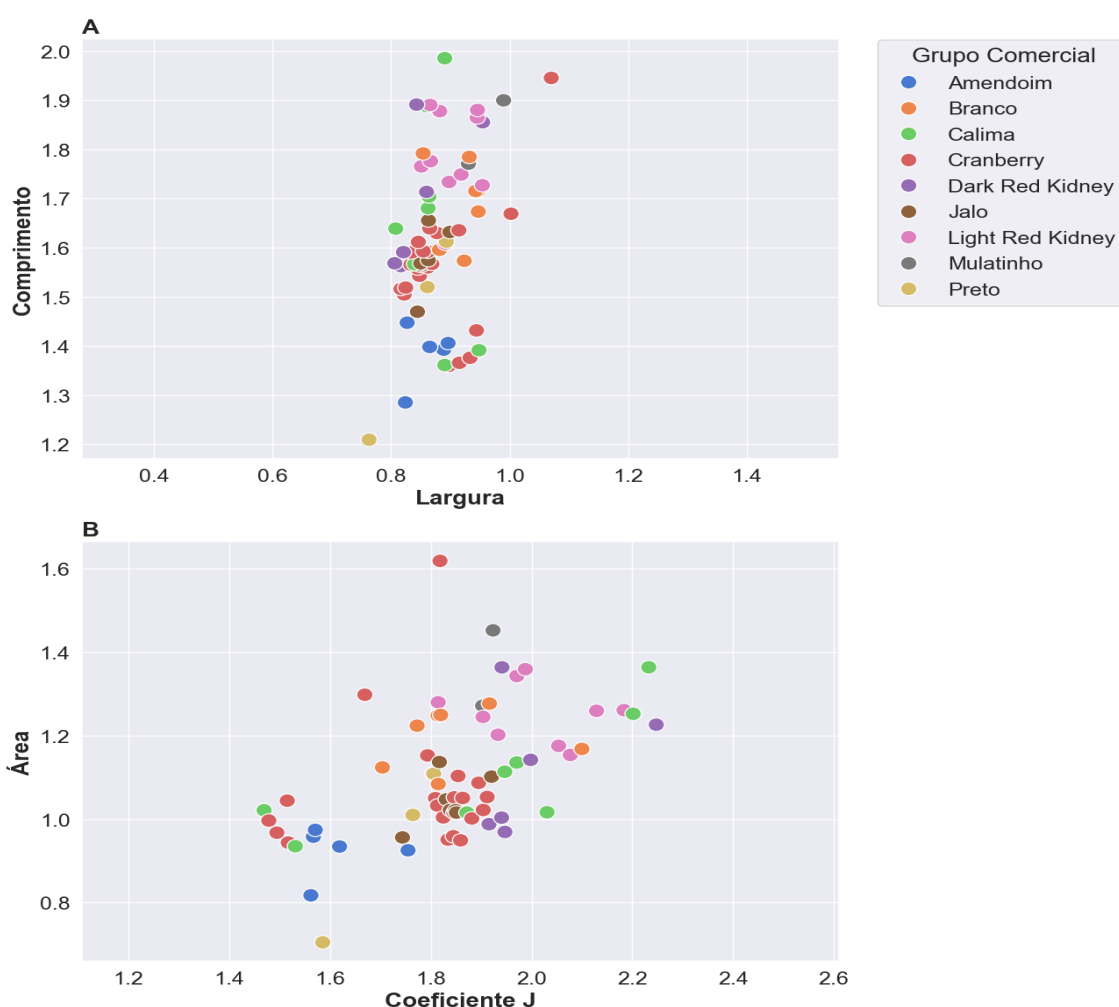


Figura 5- Dispersão das médias das linhagens quanto aos caracteres físicos e de cor dos grãos. (A) Dispersão das médias das linhagens quanto a comprimento (CP) e largura dos grãos (LG). (B) Dispersão das médias das linhagens quanto a área (AR) e coeficiente J.

4. DISCUSSÃO

As avaliações por imagens das linhagens de feijões especiais quanto aos caracteres de cor (MoL, Moa e Mob), tamanho (CP, LG e AR) e formato (coeficiente J) dos grãos apresentaram CVs iguais ou inferiores a 5,69% (Tabela 1). Enquanto neste trabalho foi observado valores de CV para MoL iguais a 3,83 e 5,69%. Silva *et al.* (2024) observaram estimativas desse parâmetro iguais 3,65 e 4,34% ao avaliar os grãos de linhagens de feijão carioca quanto a esse caráter. Gomes (2025), ao empregar imagens para avaliar linhagens de feijão vermelho, observou estimativas de CV para média dos pixels dos grãos no canal L* iguais a 8,45 e 15,51% e de 0,77 e 1,27% para média no canal a*. Cardoso (2022) também observou valores similares aos observados no presente trabalho para as estimativas desse parâmetro para CP, LG e coeficiente (J) quando empregou tanto imagens quanto paquímetro para realizar avaliações dessa natureza. Observou-se de modo geral que as estimativas de CV para todos os caracteres dos grãos avaliados no presente trabalho foram iguais ou inferiores à maioria dos trabalhos descritos na literatura (Santos et al., 2016; Ribeiro et al., 2021; Kläsener *et al.*, 2022). Portanto, destaca-se a elevada precisão experimental das avaliações por imagens das linhagens de feijões especiais quanto aos caracteres físicos e de cor dos grãos.

De acordo com Resende e Duarte (2007), as avaliações dos grãos realizadas apresentaram precisão experimental muito elevada, uma vez que todas as estimativas de acurácia foram iguais ou superiores a 0,97 (Tabela 1). As avaliações de linhagens de feijão quanto a caracteres dos grãos empregadas pelos programas de melhoramento da cultura também têm apresentado estimativas de acurácia elevadas. Arns *et al.* (2018) relataram estimativas de acurácia superiores a 0,92 ao avaliarem o tamanho dos grãos em feijão carioca. Ribeiro *et al.* (2019) e Kläsener *et al.* (2022) observaram estimativas de acurácia iguais ou superiores a 0,86 ao avaliarem, por meio de paquímetro, cultivares de feijão quanto ao comprimento, largura, espessura e formato dos grãos. Os resultados observados neste trabalho e nos demais descritos na literatura demonstram que empregar imagens para avaliar caracteres dos grãos em feijão proporcionam estimativas de média mais precisas e acuradas para linhagens quanto às diferentes características dos grãos.

A caracterização de linhagens de feijão para diferentes caracteres constitui uma importante ferramenta para auxiliar os programas de melhoramento na escolha de genitores. Mencialha *et al.* (2022) forneceram informações valiosas aos programas de melhoramento do feijoeiro ao caracterizar linhagens de feijão do tipo carioca quanto à

resistência à antracnose. Steckling (2023) também realizou a caracterização dessas mesmas linhagens, avaliadas por Mencalha *et al.* (2022), porém com foco nos caracteres dos grãos. Entretanto, ainda são escassos trabalhos dessa natureza para os feijões especiais. Um dos motivos para a ausência desses trabalhos é a dificuldade de mensuração de grande quantidade de sementes, uma vez que as avaliações por paquímetro são demoradas e trabalhosas. Assim, o emprego de imagens foi uma ferramenta de grande importância nessa caracterização, uma vez que permitiu realizar avaliações precisas e acuradas de grande quantidade de grãos de cada linhagem com rapidez e automação. Além disso, permitiu mensurar características dos grãos que são impossíveis de se obter por meio de paquímetros, como por exemplo a área.

Os resultados evidenciaram que as linhagens de feijões especiais diferiram entre si quanto aos caracteres relacionados a cor (MoL, Moa e Mob), tamanho (CP, LG e AR) e formato (Coeficiente J) dos grãos tanto em cada safra como também na média de ambas (Tabelas 1 e 2). Além disso, foi observada a presença de interação linhagens por safras de natureza simples para todas as características, com estimativas de correlação entre safras superiores a 0,88 e PC inferiores a 27% (Tabela 2). De forma semelhante, Steckling (2023) observou interação linhagens por ambientes de natureza simples ao avaliar linhagens de feijão carioca e preto quanto CP, LG e coeficiente J com emprego de paquímetro. Gomes (2025) também observou predomínio de interação linhagens por ambientes de natureza simples ao avaliar da cor do tegumento em 47 linhagens de feijão do grupo comercial vermelho.

Uma das possíveis causas da presença da interação linhagens por safras observada neste trabalho é a expressão diferencial dos genes envolvidos no controle das características avaliadas, em resposta às distintas condições ambientais (Oliveira *et al.*, 2005; Cruz, 2012; Van Eeuwijk *et al.*, 2016; Pereira *et al.*, 2017; Pires *et al.*, 2014; Barili *et al.*, 2016). Oliveira *et al.* (2005) concluíram que safra é um dos fatores que mais promove interação linhagens por ambientes para produtividade de grãos na cultura do feijoeiro. Uma vez que o tamanho dos grãos afeta a produtividade de grãos, também pode se inferir que as diferentes condições da safra também podem ter afetado a resposta nas diferentes linhagens de feijões especiais para os caracteres dos grãos. Cardoso (2022), ao avaliar por imagem linhagens de feijão carioca quanto a tamanho e formato dos grãos, constatou comportamento similar para caracteres dessa natureza.

Apesar de existir uma resposta diferencial das linhagens frente às safras quanto aos caracteres dos grãos, observou-se que não ocorreu pronunciada mudança no

ranqueamento entre safras (Tabela 2). Isso permitiu a comparação das linhagens por meio do teste de Scott-Knott (1974), ao nível de 5% de probabilidade, utilizando as médias das duas safras. Por meio deste teste constatou-se um grande número de grupos de linhagens para os diferentes caracteres dos grãos. Um dos motivos para isso é a grande variação de tamanho, formato e cor dos grãos existente entre as diferentes linhagens avaliadas. Outro motivo é a elevada precisão com que as avaliações por imagem foram realizadas, que permitiu detectar pequenas diferenças entre as médias das linhagens. Silva *et al.* (2024) e Gomes (2025) constataram que as avaliações por imagem de cor dos grãos em feijão é cerca de três vezes mais precisa que as avaliações visuais realizadas convencionalmente pelos programas de melhoramento da cultura.

O comprimento (CP), a largura (LG) são características físicas muito importantes dos grãos de feijão-comum, por permitirem informar sobre o tamanho e o formato dos grãos. Essas duas, juntamente com o coeficiente J, a espessura dos grãos e a massa de 100 grãos são as mais comuns empregadas pelos programas de melhoramento do feijoeiro para caracterizar linhagens com essa finalidade. Informações como essas são relevantes uma vez que determinam a aceitação comercial de uma nova cultivar de feijões especiais. De modo geral, os programas de melhoramento dedicados aos feijões especiais buscam desenvolver linhagens com grãos grandes e massa de 100 grãos superior a 40 gramas. A área dos grãos obtida por meio da análise de imagens é uma informação útil para melhor caracterizar os grãos de genótipos de feijão. Neste trabalho, constatou-se grande variação entre as linhagens para tamanho dos grãos. Observou-se linhagens de feijões especiais com elevada área como BRS Executivo (Cranberry) e A195 (Mulatinho), assim como, linhagens de grãos menores como BRSMG Realce (Cranberry) e BRS União (Jalo).

O coeficiente J obtido pela razão entre CP e LG tem sido utilizado rotineiramente para classificação dos grãos de feijão (Carbonell *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2019; Steckling, 2023) conforme Puerta Romero (1961) nos seguintes formatos: esférico, elíptico, oblongado/reniforme curto, oblongado/reniforme médio e oblongado/reniforme longo. Dentre as linhagens de feijões especiais avaliadas, observou-se que a maioria apresentou grãos oblongos/reniformes curtos (Figura 4D; Tabelas S2 e S3). As linhagens dos grupos branco, cranberry, jalo e preto avaliadas neste trabalho, em sua maioria, apresentaram grãos com esse formato. Entretanto, observou-se a presença de um pequeno número de linhagens desses grupos com outros formatos. Já as linhagens dos grupos dark red kidney e mulatinho apresentaram

predominância de grãos oblongos/reniformes médios. Destaca-se que linhagens de grãos pequenos ou médios como a testemunha VP22 e as do grupo amendoim apresentaram predominantemente grãos elípticos. Apesar de alguns grupos comerciais apresentarem um padrão predominante de formato dos grãos, outros já apresentaram uma variação maior. Houve linhagens do grupo calima com grãos de formatos elípticos, oblongos (reniformes curtos ou médios), enquanto que as do grupo light red kidney apresentaram grãos oblongos dos três tipos (reniforme curto, médio ou longo).

A caracterização de genótipos é uma das etapas mais importantes para a gestão de um banco de germoplasma. No caso dos feijões especiais, que existe diferentes grupos comerciais, a caracterização dos grãos é ainda mais importante pois existe uma grande variação de cores, tamanhos e formatos. Além de úteis, para a gestão do banco de germoplasma, essas informações são fundamentais para os programas de melhoramento de feijões especiais pois possibilitarão a seleção de genitores com fenótipos de interesse. Destaca-se, que ainda são poucas as cultivares desse grupo comercial e as informações a respeito delas são escassas. Assim, as informações geradas neste trabalho permitirão o adequado planejamento de cruzamentos que ampliem a variabilidade genética para caracteres associados aos grãos, fator decisivo para o sucesso dos programas de melhoramento do feijoeiro.

5. CONCLUSÃO

A interação linhagens por safras para os caracteres relacionados ao tamanho, formato e cor dos grãos foi predominantemente de natureza simples, demonstrando que a seleção para esses caracteres pode ser realizada com base em um único ambiente de avaliação ou na média dos ambientes.

O uso da análise de imagens mostrou-se eficiente e acurada para caracterizar linhagens de feijão de grãos especiais quanto à cor, formato e tamanho. Observou-se diferenças marcantes quanto ao comprimento, largura, área, coeficiente J e coloração dada pela moda nos canais L^* , a^* e b^* dos sistemas de cores CIE Lab. Esse método de avaliação poderá ser utilizado também nas fases de seleção durante o avanço das gerações e seleção das linhagens em um programa de melhoramento voltado para esse padrão comercial de grão.

6. REFERÊNCIAS

Abud, H. F., Mesquita, C. M. D. S., Sarmiento, E. C. S., Melo, R. D. S., Lima, K. A. P. D., & Silva, A. K. F. D. (2022). **Image analysis of the seeds and seedlings of**

Vigna radiata L. *Revista Ciência Agronômica*, 53, e20207303.

Arns, F. D., Ribeiro, N. D., Mezzomo, H. C., De Marco Steckling, S., Kläsener, G. R., & Casagrande, C. R. (2018). **Combined selection in carioca beans for grain size, slow darkening, and fast-cooking after storage times.** *Euphytica*, 214(4), 66.

Baek, J., Lee, E., Kim, N., Kim, S. L., Choi, I., Ji, H., . & Kim, K. H. (2020). **High throughput phenotyping for various traits on soybean seeds using image analysis.** *Sensors*, 20(1), 248.

Barili, L. D., Vale, N. M., Moura, L. M., Paula, R. G., Silva, F. F., & Carneiro, J. E. S. (2016). **Genetic progress resulting from forty-three years of breeding of the carioca common bean in Brazil.** *Genetics and Molecular Research*, 15(3), 1-11.

Blair, M. W., Medina, J. I., Astudillo, C., Rengifo, J., Beebe, S. E., Machado, G., & Graham, R. (2010). **QTL for seed iron and zinc concentration and content in a Mesoamerican common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) population.** *Theoretical and Applied Genetics*, 121, 1059-1070.

Borém, A., Miranda, G. V., & Fritsche-Neto, R. (2021). **Melhoramento de plantas.** – ISBN: 9788572695671 8. Ed. Viçosa. MG: Editora UFV. 2017. 113 p.

Capanema, L. M., Chiorato, A. F., Carbonell, S. A. M., & Fredo, C. E. (2019). **P&D e inovação com feijão: O caso do Instituto Agronômico (IAC)** [R&D and innovation in the common bean culture: The case of the Agronomic Institute (IAC)].

Cardoso, E. S. (2022). **Análise de imagens na fenotipagem do tamanho e forma de grãos de cultivares de feijoeiro.** [Master's thesis, Federal University of Lavras]

Carbonell, S. A. M., Chiorato, A. F., Gonçalves, J. G. R., Perina, E. F., & Carvalho, C. R. L. (2010). **Tamanho de grão comercial em cultivares de feijoeiro.** *Ciência Rural*, 40, 2067-2073.

Carbonell SAM, et al. (2020) **IAC Nuance and IAC Tigre: common bean cultivars for special markets.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 20(3): e 26732035.

CARNEIRO, J. E. S.; PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão do plantio a colheita.** Viçosa-MG: Editora UFV, 384 p., 2014.

Cavalcante, A. G., Lemos, L. B., Meirelles, F. C., Filla, V. A., Cavalcante, A. C. P., & de Aquino, L. A. (2021). **Agronomic and qualitative performance of some special grain bean cultivars**. *Australian Journal of Crop Science*, 15(7), 990-996.

Conab, C. N. D. A. (2023). **Acompanhamento da safra brasileira de café**. CONAB: Brasília, Brazil, 10.

Conab. **Companhia nacional de abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira – grãos**: Sétimo levantamento, abril, 2024 – safra 2022/2023 e 2023/2024.

Cruz CD, Regazzi AJ and Carneiro PCS (2012) **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Ed. UFV, Viçosa, 253p.

Cruz, C. D., & Castoldi, F. L. (1991). **Decomposição da interação genótipos x ambientes em partes simples e complexa**. *Revista Ceres*, 38(219).

Cruz, C. D. (2016). **Genes Software: Extended and integrated with the R, Matlab, and Selegen**. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 38(4), 547–552.

De Faria, J. C., de Souza, T. L. P. O., de Faria, L. C., de Almeida, V. M., da Costa, J. G. C., Marangon, M., & Abreu, A. (2022). **BRS FS308**: cultivar de feijoeiro-comum com grãos light red kidney para exportação.

Duc, N. T., Ramlal, A., Rajendran, A., Raju, D., Lal, S. K., Kumar, S., ... & Chinnusamy, V. (2023). **Image-based phenotyping of seed architectural traits and prediction of seed weight using machine learning models in soybean**. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1206357.

EMBRAPA. **Socioeconomia**. *Embrapa Arroz e Feijão*, 2023. Acesso em: 17 dez. 2024.

Gomes, D. A. **Otimizações na fenotipagem por imagem de linhagens de feijão comum quanto ao tamanho e cor de sementes**. [Tese de Doutorado, Universidade Federal de Lavras, 2025].

Howse, J. (2013). **OpenCV computer vision with python (Vol. 27)**. Birmingham, UK: Packt Publishing.

Kläsener, G. R., Ribeiro, N. D., & Argenta, H. S. (2022). **Genetic divergence and selection of bean 1222 cultivars of different grain types based on physical traits**. *Revista Ciência Agronômica*, 53, 1223 e20217820.

Kläsener, G.R., Ribeiro, N.D., Casagrande, C.R., Arns, F.D., 2020. **Consumer preference and the technological and nutritional quality of different bean colours.** *Acta Scientiarum*.

Lemos, R. D. C., Abreu, Â. D. F. B., Souza, E. A. D., Santos, J. B. D., & Ramalho, M. A. P. (2020). **A half century of a bean breeding program in the South and Alto Paranaíba regions of Minas Gerais.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 20(2), e295420211.

Mambrin, R. B., Ribeiro, N. D., Henning, L. M. M., Henning, F. A., & Barkert, K. A. (2015). **Seleção de linhagens de feijão com base no padrão e na qualidade de sementes.** *Revista Caatinga*, 28(03), 147-156.

Mencalha, J., Dias, M. A., de Souza, E. A., Carneiro, P. C. S., Carneiro, V. Q., & Carneiro, J. E. D. S. (2022). **Potential parents of carioca bean for use in breeding aiming resistance to *Colletotrichum lindemuthianum*.** *Agronomy Journal*, 114(4), 2159-2168.

Oliveira, G. V., de Souza Carneiro, P. C., dos Santos Dias, L. A., de Souza Carneiro, J. E., & Cruz, C. D. (2005). **Factor analysis in the environment stratification for the evaluation of common bean cultivars.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 5(2).

Otsu N. (1975). **A threshold selection method from gray-level histograms.** *Automática*, 11(285-296), 23-27.

Pereira, H., de Souza, T. L. P. O., de Aguiar, M. S., de Faria, L. C., da Costa, J. G. C., Cabrera Diaz, J. L., ... & Melo, L. C. (2022). **BRS FS308: Cultivar de feijoeiro-comum com grãos Light Red Kidney para exportação.**

Pereira, H. S., Bueno, L. G., Del Peloso, M. J., Abreu, A. D. F. B., Moreira, J. A. A., Martins, M., ... & Melo, L. C. (2014). **Agronomic performance and stability of Andean common bean lines with white grains in Brazil.** *Bragantia*, 73, 130-137.

Pereira, L. A., Abreu, A. F. B., Vieira Júnior, I. C., Pires, L. P. M., & Ramalho, M. A. P. (2017). **Genetic progress estimation strategy for upright common bean plants using recurrent selection.** *Genetics and Molecular Research*, 16(1), 1-9.

Pires, L. P. M., Ramalho, M. A. P., Abreu, Â. D. F. B., & Ferreira, M. C. (2014). **Recurrent mass selection for upright plant architecture in common bean.** *Scientia Agricola*, 71, 240-243.

- Puerta Romero, J. (1961). **Variedades de judias cultivadas en Espana: nueva clasificacion de la especie Phaseolus vulgaris (L. ex p.) Savi.**
- Ramalho, M. A. P., & Abreu, A. F. B. (2015). **Obtenção de cultivares.** In Carneiro, J. E. S., Paula Júnior, T. J., & Borém, A. (Eds.), *Feijão: do plantio à colheita* (pp. 96–114). Editora UFV, Viçosa, MG, Brazil.
- Rego, C. H. Q. (2020). **Avaliação da morfologia interna e do vigor de sementes de feijão-caupi por meio de técnicas de análise de imagens** (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Resende, M. D. V., & Duarte, J. B. (2007). **Precisão e controle de qualidade em experimentos 1289 de avaliação de cultivares.** *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 182-194.
- Ribeiro, N. D., Casagrande, C. R., Mezzomo, H. C., Kläsener, G. R., & Steckling, S. D. M. (2019). **Consumer preference and the technological, cooking, and nutritional quality of carioca beans.** *Semina: Ciências Agrárias*, 40(2), 651-669.
- Ribeiro, N. D., Maziero, S. M., & Argenta, H. D. S. (2023). **Genetic gain for technological traits in new cultivars developed by the Southern Brazilian common-bean network.** *Ciência e Agrotecnologia*, 47, e019322.
- Ribeiro, N. D., Mezzomo, H. C., & Kläsener, G. R. (2021). **Genetic parameters and selection of micromineral-biofortified Andean bean lines with high technological quality.** *Semina: Ciências Agrárias*, 42(2), 517-538.
- Santos, G. G. D., Ribeiro, N. D., & Maziero, S. M. (2016). **Evaluation of common bean morphological traits identifies grain thickness directly correlated with cooking time.** *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 46(1), 35-42.
- Schmitz, H., Ludwig, R., & Mambrin, R. (2020). **Caracterização morfoagronômica de feijões de grãos especiais.** *Enciclopédia biosfera*, 17, 34.
- Scott, A. J., & Knott, M. (1974). **A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance.** *Biometrics*, 30(3), 507–512. [https:// doi.org/10.2307/2529204](https://doi.org/10.2307/2529204).
- Silva, L. C. D., da Silva Cardoso, E., Mencalha, J., Gomes, D. A., de Castro Miguel, J. A., Cardoso, J. V. C. & Carneiro, V. Q. (2024). **Computer vision for assessment the seed coat color of carioca common beans.** *Agronomy Journal*, 116(5), 2141-2150.

Steckling, S. D. M. (2023). **Qualidade comercial, tecnológica e nutricional de cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) recomendadas no Brasil**. [Doctoral dissertation, Federal University of 1319 Viçosa].

Van der Walt, S., Schönberger, J. L., Nunez-Iglesias, J., Boulogne, F., Warner, J. D.,

Van Eeuwijk, F. A., Bustos-Korts, D. V., & Malosetti, M. (2016). **What should students in plant breeding know about the statistical aspects of genotype× environment interactions?** *Crop Science*, 56(5), 2119-2140.

Van Rossum, G., & Drake Jr, F. L. (2014). **The Python language reference**. *Python Software Foundation: Wilmington, DE, USA*.

Yang, S., Zheng, L., He, P., Wu, T., Sun, S., & Wang, M. (2021). **High-throughput soybean seed phenotyping with convolutional neurais networks and transfer learning**. *Plant Methods*, 17(1), 50.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela S1 – Grupos comerciais das 68 linhagens de feijão de grãos especiais e da testemunha VP22, do grupo comercial preto.

Linhagens	Grupo Comercial
CFE 134	Amendoim
CF 250032	Amendoim
CFE 39	Amendoim
CF 240108	Amendoim
Rainha	Amendoim
Waf 141	Branco
Kabon	Branco
Ouro Graudo	Branco
BRS Ártico	Branco
IPR Garça	Branco
Ouro Branco	Branco
WAF 75	Branco
Amendoim	Calima
CAL 143	Calima
CFE 46	Calima
CF 250028	Calima
CF 250013	Calima
IAC Boreal	Calima
CF 200059	Calima
BRS FS 305	Calima
Pintado	Cranberry
RC2/RAD-155	Cranberry
BRSMG Realce	Cranberry
Iraí	Cranberry
Tico Tico	Cranberry
Pintado Bolinha	Cranberry

BRS Radiante	Cranberry
CNFRJ 10564	Cranberry
CNFRJ 10556	Cranberry
CF 900003	Cranberry
CNFRJ 10571	Cranberry
Cacahuati Bola	Cranberry
IAC Harmonia	Cranberry
Cacahuati 72	Cranberry
CF 840080	Cranberry
BRS FS 311	Cranberry
Carnaval	Cranberry
CF 800151	Cranberry
CF 870840	Cranberry
Hooter	Cranberry
BRS Executivo	Cranberry
CF 840045	Dark Red Kidney
CF 250005	Dark Red Kidney

Tabela S1(continuação) – Grupos comerciais das 68 linhagens de feijão de grãos especiais e da testemunha VP22, do grupo comercial preto.

Linhagens	Grupo Comercial
CF 250015	Dark Red Kidney
BRS Embaixador	Dark Red Kidney
CF 240114	Dark Red Kidney
Montcalm	Dark Red Kidney
BRSMG União	Jalo
BJ 3	Jalo
BJ 8	Jalo
BJ 5	Jalo
BJ 7	Jalo
RAD/E550-284	Jalo
Novo Jalo	Jalo
Vermelhão	Light Red Kidney
CF 250007	Light Red Kidney
BRS FS 308	Light Red Kidney
VERMELHO 1	Light Red Kidney
CF 230023	Light Red Kidney
Red Kanner	Light Red Kidney
Light Red Kidney	Light Red Kidney
CF 840070	Light Red Kidney
Feijão Sopa	Light Red Kidney
Chinook	Light Red Kidney
Manteigão Fosco 11	Mulatinho
A 195	Mulatinho
VP 22	Preto
Manteigão Preto	Preto
Preto Sessenta Dias	Preto

Fonte: O autor (2025)

Tabela S2– Médias de 69 linhagens de feijão-comum de grãos especiais, avaliadas quanto às modas dos pixels nos canais L (MoL), *a* (Moa) e *b** (Mob), nas safras de seca e outono-inverno de 2021, agrupadas pelo teste de Scott-Knott (1974).

Linhagens	G. Comercial ¹	FOR ²	MoL		Moa		Mob
CFE 134	Amendoim	ELPC	37,0618	j ³	156,4851	c	134,9874 i
CF 250032	Amendoim	RC	44,8578	i	157,4349	b	136,1028 h
CFE 39	Amendoim	ELPC	37,93	j	157,0367	c	136,7217 h
CF 240108	Amendoim	ELPC	105,1157	e	158,5735	b	140,0275 e
Rainha	Amendoim	ELPC	99,8185	e	158,6657	b	139,1664 f
Waf 141	Branco	RC	201,2005	a	134,0956	k	127,547 m
Kabon	Branco	RC	206,95	a	133,7733	k	127,9725 m
Ouro Graudo	Branco	RL	208,3757	a	133,7649	k	127,7774 m
BRS Ártico	Branco	RC	207,0251	a	133,7416	k	126,8946 n
IPR Garça	Branco	RC	208,602	a	133,5486	k	128,2846 l
Ouro Branco	Branco	RC	209,4517	a	133,67	k	126,6017 n
WAF 75	Branco	RM	211,3833	a	133,4867	k	126,3617 n
Amendoim	Calima	ELPC	42,3383	j	151,965	d	130,4517 k
CAL 143	Calima	RM	73,2272	g	158,3802	b	132,8602 j
CFE 46	Calima	RL	46,1833	i	158,2033	b	136,835 h
CF 250028	Calima	ELPC	105,711	e	151,1486	d	125,8122 n
CF 250013	Calima	RM	40,9599	j	147,5271	f	129,3997 k
IAC Boreal	Calima	RM	53,565	h	157,8117	b	129,495 k
CF 200059	Calima	RL	38,0017	j	152,6667	d	128,575 l
BRS FS 305	Calima	RL	40,4576	j	152,9501	d	129,2313 k
Pintado	Cranberry	ELPC	175,1733	b	138,5267	i	134,1967 j
RC2/RAD-155	Cranberry	RC	166,9716	c	139,0252	i	133,7121 j
BRSMG Realce	Cranberry	RC	167,145	c	140,205	h	135,2567 i
Iraí	Cranberry	RC	174,4831	b	139,0938	i	134,7929 i
Tico Tico	Cranberry	ELPC	169,3683	c	139,0467	i	133,9117 j
Pintado Bolinha	Cranberry	ELPC	168,785	c	139,06	i	133,6417 j
BRS Radiante	Cranberry	RM	162,3267	c	140,3317	h	135,7317 i
CNFRJ 10564	Cranberry	RC	168,5131	c	139,476	i	135,0784 i
CNFRJ 10556	Cranberry	RC	167,0219	c	139,643	h	134,6039 i
CF 900003	Cranberry	RM	176,4817	b	138,6067	i	133,8617 j
CNFRJ 10571	Cranberry	RC	169,8446	c	139,6215	h	134,7463 i
Cacahuati Bola	Cranberry	ELPC	171,741	b	138,7303	i	133,6355 j
IAC Harmonia	Cranberry	RC	165,645	c	140,09	h	135,8717 i
Cacahuati 72	Cranberry	RM	164,7187	c	140,6001	h	136,3165 h
CF 840080	Cranberry	RC	167,9603	c	139,3846	i	135,1306 i
BRS FS 311	Cranberry	RM	168,83	c	139,2117	i	134,155 j
Carnaval	Cranberry	RM	174,1577	b	139,0441	i	134,534 i
CF 800151	Cranberry	RC	174,2361	b	139,326	i	136,9889 h
CF 870840	Cranberry	RC	176,055	b	138,805	i	132,9367 j
Hooter	Cranberry	RC	173,9537	b	138,4645	i	132,8294 j

¹ G. Comercial: Grupo comercial; ²FOR: Formatos (ELPC – Elíptico; RC- Oblongo/reniforme curto; RM – Oblongo/reniforme médio; RL – Oblongo/reniforme longo); ³ Linhagens com letras iguais na coluna são alocados no mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott (1974) a 5% de probabilidade

Tabela S2– (continuação) Médias de 69 linhagens de feijão-comum de grãos especiais, avaliadas quanto às modas dos pixels nos canais L (MoL), a (Moa) e b* (Mob), nas safras de seca e outono-inverno de 2021, agrupadas pelo teste de Scott-Knott (1974).

Linhagens	G. Comercial ¹	FOR ²	MoL	Moa	Mob
BRS Executivo	Cranberry	RC	182,0002 b ⁵	137,3906 i	134,9457 i
CF 840045	DRK ³	RM	14,0417 m	141,31 h	125,085 o
CF 250005	DRK	RM	16,3583 m	144,0517 g	124,1233 o
CF 250015	DRK	RM	19,1475 l	144,8765 g	125,636 n
BRS Embaixador	DRK	RM	25,8951 k	152,5444 d	129,6421 k
CF 240114	DRK	RL	26,7042 k	149,3383 e	127,752 m
Montcalm	DRK	RM	32,5849 j	156,7499 c	138,3806 f
BRSMG União	Jalo	RC	166,8595 c	136,2645 j	142,8759 d
BJ 3	Jalo	RC	171,6467 b	135,1667 j	143,6133 d
BJ 8	Jalo	RC	169,4217 c	135,7883 j	142,7267 d
BJ 5	Jalo	RC	171,6259 b	135,7036 j	142,944 d
BJ 7	Jalo	RC	173,0427 b	135,0124 j	142,4924 d
RAD/E550-284	Jalo	RM	168,8566 c	135,5387 j	144,4292 c
Novo Jalo	Jalo	RC	161,2742 c	136,0395 j	146,4937 b
Vermelhão	LRK ⁴	RC	35,3723 j	155,8454 c	137,4532 g
CF 250007	LRK	RL	93,0933 f	157,7783 b	145,7067 c
BRS FS 308	LRK	RL	93,1967 f	157,9866 b	144,9831 c
VERMELHO 1	LRK	RM	35,1636 j	156,3905 c	137,9632 g
CF 230023	LRK	RM	35,3483 j	157,5483 b	137,675 g
Red Kanner	LRK	RL	90,4577 f	161,2758 a	148,2928 a
Light Red Kidney	LRK	RL	109,1901 e	159,9786 a	141,734 d
CF 840070	LRK	RC	85,7564 f	157,3704 b	138,8144 f
Feijão Sopa	LRK	RM	115,5067 d	155,87 c	144,545 c
Chinook	LRK	RM	107,0683 e	158,1683 b	146,355 b
Manteigão Fosco 11	Mulatinho	RM	169,487 c	137,6432 i	137,7046 g
A 195	Mulatinho	RM	167,9643 c	139,9203 h	145,6044 c
VP 22	Preto	ELPC	14,58 m	132,405 k	120,6167 q
Manteigão Preto	Preto	RC	9,255 m	130,8117 l	122,1683 p
Preto Sessenta Dias	Preto	RC	9,4671 m	130,8557 l	121,8244 p

¹ G. Comercial: Grupo comercial; ²FOR: Formatos (ELPC – Elíptico; RC- Oblongo/reniforme curto; RM – Oblongo/reniforme médio; RL – Oblongo/reniforme longo); ³DRK: Dark Red Kidney; ⁴LRK: Light Red Kidney; ⁵ Linhagens com letras iguais na coluna são alocados no mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott (1974) a 5% de probabilidade.

Fonte: O autor (2025)

Tabela S3 – Médias de 69 linhagens de feijão-comum de grãos especiais, avaliadas quanto a comprimento (CP), largura (LG), coeficiente J e área (AR) dos grãos nas safras de seca e outono-inverno de 2021, agrupadas pelo teste de Scott-Knott (1974).

Linhagens	G.Comercial ¹	FOR ²	CP	LG	J	AR
CFE 134	Amendoim	ELPC	1,2849	j ³ 0,824	h	1,5619 r 0,8175 i
CF 250032	Amendoim	RC	1,4473	h 0,827	h	1,7547 n 0,9253 h
CFE 39	Amendoim	ELPC	1,398	i 0,8651	f	1,6188 q 0,9343 h
CF 240108	Amendoim	ELPC	1,3924	i 0,8887	e	1,5669 r 0,9579 h
Rainha	Amendoim	ELPC	1,4058	i 0,8961	e	1,5707 r 0,9742 h
Waf 141	Branco	RC	1,5958	e 0,8816	e	1,8148 l 1,084 f
Kabon	Branco	RC	1,5733	f 0,9234	d	1,704 o 1,1237 f
Ouro Graudo	Branco	RL	1,7919	c 0,854	f	2,0998 d 1,1679 e
BRS Ártico	Branco	RC	1,6735	d 0,9471	c	1,7728 m 1,2236 d
IPR Garça	Branco	RC	1,715	d 0,9462	c	1,8144 l 1,248 d
Ouro Branco	Branco	RC	1,7154	d 0,9427	c	1,8196 l 1,2493 d
WAF 75	Branco	RM	1,7847	c 0,9319	d	1,9164 i 1,2765 d
Amendoim	Calima	ELPC	1,361	i 0,8905	e	1,5311 s 0,9351 h
CAL 143	Calima	RM	1,5666	f 0,8395	g	1,8715 k 1,0155 g
CFE 46	Calima	RL	1,6388	e 0,8077	h	2,0306 f 1,0163 g
CF 250028	Calima	ELPC	1,3913	i 0,9483	c	1,469 t 1,0211 g
CF 250013	Calima	RM	1,6804	d 0,8625	f	1,9468 h 1,1133 f
IAC Boreal	Calima	RM	1,7043	d 0,8637	f	1,9706 g 1,1354 f
CF 200059	Calima	RL	1,8885	b 0,8596	f	2,2015 b 1,252 d
BRS FS 305	Calima	RL	1,9857	a 0,8905	e	2,2326 a 1,3634 c
Pintado	Cranberry	ELPC	1,3594	i 0,8973	e	1,517 s 0,9438 h
RC2/RAD-155	Cranberry	RC	1,516	g 0,8165	h	1,8591 k 0,9491 h
BRS MG Realce	Cranberry	RC	1,5049	g 0,822	h	1,8339 k 0,9509 h
Iraí	Cranberry	RC	1,5187	g 0,8246	h	1,8447 k 0,959 h
Tico Tico	Cranberry	ELPC	1,3656	i 0,9152	d	1,4944 t 0,9675 h
Pintado Bolinha	Cranberry	ELPC	1,3758	i 0,9332	d	1,4784 t 0,9965 g
BRS Radiante	Cranberry	RM	1,5657	f 0,8332	g	1,8813 j 1,0015 g
CNFRJ 10564	Cranberry	RC	1,5428	f 0,8479	g	1,8246 l 1,004 g
CNFRJ 10556	Cranberry	RC	1,5576	f 0,8449	g	1,8459 k 1,0153 g
CF 900003	Cranberry	RM	1,5903	e 0,8343	g	1,904 j 1,0218 g
CNFRJ 10571	Cranberry	RC	1,5599	f 0,8619	f	1,8131 l 1,0324 g
Cacahuati Bola	Cranberry	ELPC	1,4316	h 0,944	c	1,515 s 1,0441 g
IAC Harmonia	Cranberry	RC	1,5671	f 0,8687	f	1,8091 l 1,0501 g
Cacahuati 72	Cranberry	RM	1,5926	e 0,8544	f	1,8632 k 1,0506 g
CF 840080	Cranberry	RC	1,5918	e 0,8622	f	1,8466 k 1,052 g
BRS FS 311	Cranberry	RM	1,6116	e 0,8459	g	1,9119 i 1,0529 g
Carnaval	Cranberry	RM	1,6395	e 0,8651	f	1,8949 j 1,0868 f
CF 800151	Cranberry	RC	1,63	e 0,8773	e	1,854 k 1,1032 f
CF 870840	Cranberry	RC	1,6354	e 0,9143	d	1,7934 m 1,1524 e
Hooter	Cranberry	RC	1,6691	d 1,0023	b	1,669 p 1,2977 d

¹ G. Comercial: Grupo comercial; ²FOR: Formatos (ELPC – Elíptico; RC- Oblongo/reniforme curto; RM – Oblongo/reniforme médio; RL – Oblongo/reniforme longo); ³ Linhagens com letras iguais na coluna são alocados no mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott (1974) a 5% de probabilidade.

Tabela S3 (continuação) - Agrupamento (Scott-Knott, 1974) das médias das 69 linhagens avaliadas quanto a comprimento (CP), largura (LG), coeficiente J e área (AR) dos grãos nas safras de seca e outono-inverno de 2021.

Linhagens	G.Comercial ¹	FOR ²	CP	LG	J	AR
BRS Executivo	Cranberry	RC	1,9456 a ⁵	1,0703	a	1,8182 l 1,6181 a
CF 840045	DRK ³	RM	1,5682 f	0,8061	h	1,9471 h 0,9692 h
CF 250005	DRK	RM	1,5626 f	0,8162	h	1,9154 i 0,9878 h
CF 250015	DRK	RM	1,5909 e	0,8208	h	1,9404 h 1,0034 g
BRS Embaixador	DRK	RM	1,7135 d	0,8597	f	1,9981 g 1,1418 f
CF 240114	DRK	RL	1,8913 b	0,8429	g	2,2474 a 1,226 d
Montcalm	DRK	RM	1,8554 b	0,9544	c	1,9411 h 1,3633 c
BRSMG União	Jalo	RC	1,4696 h	0,8444	g	1,7437 n 0,9561 h
BJ 3	Jalo	RC	1,5645 f	0,8465	g	1,8508 k 1,0156 g
BJ 8	Jalo	RC	1,5681 f	0,8499	g	1,8492 k 1,0213 g
BJ 5	Jalo	RC	1,563 f	0,8508	g	1,8386 k 1,0218 g
BJ 7	Jalo	RC	1,5746 f	0,8627	f	1,8307 l 1,0471 g
RAD/E550-284	Jalo	RM	1,6555 e	0,863	f	1,9205 i 1,1016 f
Novo Jalo	Jalo	RC	1,6319 e	0,8991	e	1,817 l 1,1365 f
Vermelhão	LRK ⁴	RC	1,6082 e	0,8915	e	1,803 l 1,1091 f
CF 250007	LRK	RL	1,7655 c	0,851	g	2,0768 e 1,1535 e
BRS FS 308	LRK	RL	1,7762 c	0,8666	f	2,0536 f 1,1753 e
VERMELHO 1	LRK	RM	1,7338 d	0,8977	e	1,9333 i 1,2018 e
CF 230023	LRK	RM	1,749 c	0,9182	d	1,9035 j 1,2446 d
Red Kanner	LRK	RL	1,878 b	0,882	e	2,1289 c 1,2592 d
Light Red Kidney	LRK	RL	1,8906 b	0,8657	f	2,1834 b 1,2607 d
CF 840070	LRK	RC	1,7271 d	0,954	c	1,8146 l 1,2796 d
Feijão Sopa	LRK	RM	1,8649 b	0,9452	c	1,9707 g 1,3425 c
Chinook	LRK	RM	1,8804 b	0,9458	c	1,9876 g 1,3588 c
Manteigão Fosco 11	Mulatinho	RM	1,7711 c	0,9305	d	1,9028 j 1,2712 d
A 195	Mulatinho	RM	1,9 b	0,9898	b	1,9235 i 1,4518 b
VP 22	Preto	ELPC	1,209 k	0,7627	i	1,5854 r 0,7049 j
Manteigão Preto	Preto	RC	1,5198 g	0,8611	f	1,7642 n 1,01 g
Preto Sessenta Dias	Preto	RC	1,6122 e	0,8931	e	1,8058 l 1,1084 f

¹ G. Comercial: Grupo comercial; ²FOR: Formatos (ELPC – Elíptico; RC- Oblongo/reniforme curto; RM – Oblongo/reniforme médio; RL – Oblongo/reniforme longo); ³DRK: Dark Red Kidney; ⁴LRK: Light Red Kidney; ⁵ Linhagens com letras iguais na coluna são alocados no mesmo grupo pelo teste de Scott-Knott (1974) a 5% de probabilidade.

Fonte: O autor (2025)

ARTIGO 2- ANÁLISE DE FATORES COMO ESTRATÉGIA NA SELEÇÃO DE GENITORES E ORIENTAÇÃO DE CRUZAMENTOS NO MELHORAMENTO DE FEIJÃO COMUM

Artigo redigido conforme as normas da revista Agronomy Journal - Versão preliminar	
Título do artigo:	Análise de fatores como estratégia na seleção de genitores e orientação de cruzamentos no melhoramento de feijão comum
Autores:	José Eulário Lampi Dique
	Júlio Augusto de Castro Miguel
	José Eustáquio de Souza Carneiro
	Tiago de Souza Marçal
	Pedro Crescêncio Souza Carneiro
	Elaine Aparecida de Souza
	Vinícius Quintão Carneiro
Periódico:	Agronomy Journal
ISSN	
DOI	

Análise de fatores como estratégia na seleção de genitores e orientação de cruzamentos no melhoramento de feijão

RESUMO

A escolha de genitores e o planejamento dos cruzamentos é a etapa mais importante para o sucesso de um programa de melhoramento do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.). Assim, o objetivo deste trabalho foi apresentar uma estratégia multi-caráter e multi-ambiente para escolha de genitores e orientação de cruzamentos. Foram avaliadas 53 linhagens de feijão de grãos especiais quanto a produtividades de grãos (PROD), massa de 100 grãos (M100G) e arquitetura de plantas (ARQ) em dois municípios do Estado de Minas Gerais. Os dados de avaliação das linhagens quanto a esses caracteres em diferentes safras foram submetidos a duas análises de fatores. Uma somente para PROD e a outra envolveu M100G e ARQ conjuntamente. Na análise de fatores para PROD, as avaliações realizadas nas safras da seca, águas e outono-inverno apresentaram cargas fatoriais superiores a 0,62, 0,69 e 0,57 com o primeiro, segundo e terceiro fatores, respectivamente. Portanto, verificou-se que cada fator serviu para selecionar genitores específicos para cada safra e orientar cruzamentos entre linhagens superiores em safras distintas. A análise de fatores para ARQ e M100G apresentou dois fatores. O primeiro demonstrou cargas fatoriais superiores a 0,73 com as avaliações de ARQ enquanto o segundo demonstrou cargas fatoriais para as avaliações de M100G superiores a 0,92. Cada fator foi utilizado para selecionar genitores para cada um desses caracteres e orientar os cruzamentos. Portanto, esses resultados evidenciaram tanto a capacidade da análise de fatores para selecionar genitores visando diferentes caracteres avaliados em diferentes safras quanto para orientar os cruzamentos nos programas de melhoramento do feijoeiro.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L.; hibridação; interação genótipos por ambientes.

ABSTRACT

The selection of parents and the planning of crosses are the most critical steps for the success of a common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) breeding program. Therefore, the objective of this study was to present a multi-trait and multi-environment strategy for parent selection and cross planning. A total of 53 specialty grain bean lines were evaluated for grain yield (PROD), 100-grain weight (M100G), and plant architecture (ARQ) in two municipalities in the state of Minas Gerais, Brazil. The evaluation data for these traits across different seasons were subjected to two separate factor analyses: one for PROD alone and another combining M100G and ARQ. In the factor analysis for PROD, evaluations conducted in the dry, rainy, and autumn-winter seasons with yielded factor loadings of 0.62, 0.69, and 0.57 for the first, second, and third factors, respectively. This indicates that each factor was useful for selecting specific parents for each season and for guiding crosses between superior lines evaluated in different growing conditions. The factor analysis for ARQ and M100G resulted in two factors. The first showed factor loadings above 0.73 for ARQ evaluations, while the second showed loadings above 0.92 for M100G evaluations. Each factor was used to select parents for each respective trait and to guide cross combinations. These results highlight the effectiveness of factor analysis both in selecting parents for different traits evaluated across multiple growing seasons and in guiding crosses within common bean breeding programs.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L.; hybridization; genotype by environment interaction.

1. INTRODUÇÃO

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das principais fontes de proteína vegetal na dieta em países da Ásia, América e África (Broughton *et al.*, 2003; De Ron *et al.*, 2016; Nadeem *et al.*, 2021). Devido à sua importância nutricional e econômica, a cultura é amplamente cultivada em todo o mundo, com elevada produção nesses continentes (FAOSTAT, 2024). O Brasil, que é o maior produtor mundial dessa leguminosa, registrou, na safra 2023/2024, uma produção de aproximadamente 3,06 milhões de toneladas, em uma área de 2,78 milhões de hectares, resultando em uma produtividade média de 1676 kg ha⁻¹ (EMBRAPA, 2024). Os feijões têm origem na América, com dois centros principais de domesticação: Mesoamérica (México e América Central) e os Andes (Argentina, Chile, Bolívia e Peru) (Gepts *et al.*, 1991; Parker *et al.*, 2021). No Brasil, predominam os feijões de origem mesoamericana, como os tipos carioca, preto e vermelho, que têm maior consumo interno (Pereira, 2019; CONAB, 2023). Já os feijões de origem andina, de grãos mais graúdos, denominados no Brasil como “feijões de grãos especiais” ou grupo “manteigão”, representam somente 3% da produção brasileira (EMBRAPA, 2024; CONAB, 2023). Entretanto, o cultivo desses feijões tem crescido no Brasil devido ao seu maior valor comercial. Além disso, os feijões de grãos especiais têm uma demanda em nível internacional, especialmente na Europa e na África, o que justifica seu cultivo para o mercado externo (Cavalcante *et al.*, 2021; CONAB, 2023; EMBRAPA, 2024).

Os programas de melhoramento de feijões especiais têm buscado desenvolver linhagens com maior produtividade de grãos, arquitetura adaptada a colheita mecanizada, resistentes a doenças e que melhor se adaptam às condições edafoclimáticas onde são cultivadas (Ribeiro *et al.*, 2019; Carbonell *et al.*, 2020). A massa de 100 grãos também tem grande importância no melhoramento desses feijões, uma vez que a demanda do mercado é por grãos mais graúdos. Assim, esta e outras características devem ser consideradas tanto na seleção dos genitores quanto na orientação dos cruzamentos (Aguiler *et al.*, 2023; Cerutti *et al.*, 2020; Ramalho *et al.*, 2024). Isso é essencial também para a formação de populações-base em programas de melhoramento do feijoeiro que utilizam a seleção recorrente como estratégia (Junior *et al.*, 2024; Costa *et al.*, 2024).

A escolha de genitores e a orientação dos cruzamentos é etapa fundamental para o sucesso de qualquer programa de melhoramento do feijoeiro baseado na hibridação (Borém *et al.*, 2021). Segundo Ramalho *et al.* (2024), essa etapa é determinante para obtenção de linhagens superiores, já que a escolha incorreta de genitores não permitirá obter populações

segregantes com média desejável para os caracteres de interesse e variabilidade suficiente que permita a obtenção de novas cultivares superiores. Essa etapa tem sido realizada com auxílio de metodologias baseadas em informações dos possíveis genitores ou na descendência de cruzamentos (Gandhi, 2024). A escolha dos genitores baseada no desempenho per se tem sido realizada para um ou mais caracteres de importância (Rocha *et al.*, 2018; Mencalha *et al.*, 2022). Porém, quanto maior o número de caracteres considerados, maior é a dificuldade de encontrar genitores que agreguem todos os alelos favoráveis (Olivoto *et al.*, 2019; Rocha *et al.*, 2018). Por isso, a orientação adequada dos cruzamentos se faz necessária para que permita a obtenção de linhagens com fenótipos de interesse para os vários caracteres. Algumas estratégias para seleção de genitores têm sido empregadas no melhoramento do feijoeiro como os dialelos completos (Ceyhan *et al.*, 2021; Gonçalves *et al.*, 2024), dialelos parciais (Silva *et al.*, 2013; Moura *et al.*, 2016; Arruda *et al.*, 2019) e dialelos circulantes (Alves *et al.*, 2017). Porém, existe escassez de informações sobre novas abordagens na orientação de cruzamentos quando se almeja utilizar informações dos genitores quanto a vários caracteres avaliados em mais ambientes.

O desempenho dos possíveis genitores pode não ser coincidente nas diferentes condições ambientais que a cultura é submetida devido a interação genótipos por ambientes. Essa interação desempenha fundamental importância no feijoeiro, uma vez que essa cultura é cultivada sob diferentes condições edafoclimáticas, envolvendo locais, anos e safras. Segundo Oliveira *et al.* (2005), a interação linhagens por safras é a mais pronunciada no caso do feijoeiro, já que as condições de temperatura e umidade são bastante distintas nas três safras de cultivo. Apesar dessa interação ser de extrema importância para o melhoramento do feijoeiro, não existem informações sobre como esta deve ser contemplada na etapa de seleção de genitores e orientação de cruzamentos. Além disso, a falta de informação sobre o desempenho per se das linhagens de feijão de grãos especiais em diferentes safras de cultivo do feijoeiro tem dificultado a escolha dos genitores e orientação dos cruzamentos. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi apresentar uma estratégia multi-caráter e multi-ambiente para escolha de genitores e orientação de cruzamentos no melhoramento do feijoeiro.

2. MATERIAL E MÉTODO

2.1 Avaliação do material vegetal

Cinquenta e três linhagens de feijão de grãos especiais (Tabela S1) foram avaliadas em sete experimentos de 2019 a 2023, nos municípios de Lavras e Coimbra do Estado de Minas Gerais (Tabela S2). Os experimentos foram conduzidos nas safras da seca, outono-inverno e águas no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Agropecuária da Universidade Federal de Lavras (CDCTA - UFLA), localizado no município de Lavras (21°58' de latitude Sul, 42°22' longitude Oeste e 918 metros de altitude) e na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão de Coimbra (UEPE Coimbra), pertencente a Universidade Federal de Viçosa, localizada no município de Coimbra (20°51' latitude Sul, 42°48' longitude Oeste e 720 m de altitude). O delineamento experimental adotado em todos os experimentos foi de blocos ao acaso com três repetições. As parcelas experimentais foram constituídas de duas linhas de dois metros, espaçadas de 0,6 metros entre linhas e uma densidade de plantio de 15 sementes por metro. A adubação e os tratos culturais empregados foram de acordo com o recomendado para a cultura do feijão (Carneiro et al., 2015).

Os caracteres avaliados nos experimentos foram produtividade de grãos (PROD), massa de 100 grãos (M100G) e arquitetura de plantas (ARQ). As características PROD, ARQ e M100G foram avaliadas em sete, seis e três experimentos, respectivamente. A PROD foi obtida em gramas por parcela, e posteriormente, convertida para kg ha⁻¹. A M100G, em gramas, foi obtida pela mensuração de uma amostra de 100 grãos de cada parcela. A ARQ a nível de parcela foi avaliada por meio de escala de notas conforme Collichio *et al.* (1997), adaptada para feijões de grãos especiais: 1 - plantas de hábito I ou II, ereta, com uma haste e com inserção alta das primeiras vagens; 2 - plantas de hábito I ou II, ereta e com uma guia curta; 3 - plantas de hábito I ou II, ereta e com algumas ramificações; 4 - plantas de hábito I ou II, ereta e com algumas guias longas; 5 - plantas de hábito II ou III, ereta, com muitas ramificações e tendência à prostrada; 6 - plantas de hábito II ou III, semi-ereta e pouco prostrada; 7 - plantas de hábito III, semi-ereta e medianamente prostrada; 8 - plantas de hábito III, prostrada; 9 - plantas de hábito III, com internódios longos e muito prostrada.

2.2 Análises Estatísticas

Os dados de avaliação das linhagens em cada experimento quanto às características mensuradas foram submetidos à análise individual de variância conforme o modelo estatístico: $y_{ij} = \mu + l_i + b_j + e_{ij}$, em que: y_{ij} é a observação da i -ésima linhagem no j -ésimo bloco; μ é intercepto; l_i é o efeito fixo de linhagem; b_j é o efeito aleatório de bloco, com $b_j \sim \text{NIID}(0, \sigma_b^2)$; e_{ij} é o erro aleatório que incide sobre a i -ésima linhagem no j -ésimo bloco, com $e_{ij} \sim \text{NIID}(0, \sigma_e^2)$. A acurácia seletiva (r_{gg}) foi estimada conforme Resende & Duarte. (2007), por meio da seguinte equação: $r_{gg} = \sqrt{1 - \frac{1}{F}}$, em que F (Snedecor) é o valor da razão entre os quadrados médios de linhagens e resíduo da análise individual de variância.

O coeficiente de variação experimental (CV%) para PROD e M100G foi obtido por meio da equação: $CV = 100 \times \frac{\sqrt{QMR}}{\bar{S}}$, em que QMR é o quadrado médio do resíduo e $\bar{S}$ é a média da característica avaliada no experimento. Já para ARQ foi adotado o CV ajustado para caracteres cuja avaliação é realizada por escala de notas (dos Anjos *et al.*, 2019): $CV_{aj} = 100 \times \frac{\sqrt{QMR}}{|\bar{S} - u|}$, em que u é o valor numérico associado ao valor indesejado da escala de notas da característica avaliada.

Os dados de avaliação dos experimentos também foram submetidos a análises conjuntas de variância conforme o modelo descrito na equação: $y_{ijk} = \mu + b_{j(k)} + l_i + a_k + (la)_{ik} + e_{ijk}$, em que, y_{ijk} é o valor observado na parcela que recebeu a linhagem i no bloco j dentro do ambiente k ; μ é a média geral de cada característica considerando todos os ambientes; l_i é o efeito fixo de linhagem; $b_{j(k)}$ é efeito aleatório do bloco j dentro do ambiente k , com $b_{j(k)} \sim \text{NIID}(0, \sigma_b^2)$; a_k é o efeito fixo do ambiente k ; $(la)_{ik}$ é o efeito fixo da interação linhagens por ambientes; e_{ijk} é o erro aleatório que incide sobre cada linhagem i nos j blocos dos k ambientes, com $e_{ijk} \sim \text{NIID}(0, \sigma_e^2)$.

Uma vez detectada a presença de interação linhagens por ambientes significativa, foi realizado estudo para identificar a natureza da interação linhagens por pares de ambientes. Para isso foi estimada a correlação de Pearson (r), entre as médias das linhagens para cada característica nos pares de ambientes. Também foi estimado o percentual da parte complexa (PC) desta interação por meio da metodologia proposta por Cruz & Castoldi (1991): $PC = \sqrt{(1 - r)^3 Q_1 Q_2}$, em que Q_1 e Q_2 referem-se aos quadrados médios de linhagens para a característica em estudo nos pares de ambientes, e r é a correlação de Pearson entre o desempenho médio das linhagens nos dois ambientes.

Os dados de avaliação das linhagens quanto aos caracteres avaliados nas diferentes

safras foram submetidos a duas análises de fatores. Uma somente para PROD e a outra envolveu M100G e ARQ conjuntamente. Cada uma das avaliações de PROD nas diferentes safras foram consideradas como uma nova variável na análise de fatores pois observou-se presença de interação genótipos por ambientes. O mesmo foi considerado para a análise de fatores realizada para M100G e ARQ conjuntamente. Essas análises de fatores foram realizadas conforme modelo descrito por Cruz *et al.* (2014): $x_j = \sum_{k=1}^m l_{jk}F_k + \varepsilon_j$, no qual x_j são as médias padronizadas das linhagens quanto à j-ésima variável avaliada, l_{jk} é a carga fatorial para a j-ésima variável associada ao k-ésimo vetor, F_k é o k-ésimo fator comum; e ε_j é o fator específico associado a j-ésima variável. O número de fatores adotado em cada análise foi aquele em que os escores desses representaram pelo menos 69% da variação, ou seja, observou-se nas análises valores médios de comunalidade iguais ou superiores a 0,69, conforme Johnson and Wichern (1992).

A escolha dos genitores e a orientação dos cruzamentos foram realizadas com base em duas estratégias em simultâneo: baseada somente nos escores das análises de fatores e no índice genótipo-ideótipo associado às duas análises de fatores realizadas para PROD, ARQ e M100G. O índice genótipo-ideótipo consistiu na distância euclidiana média entre os escores de cada linhagem e os ideótipo nas análises de fatores para PROD individualmente e M100G e ARQ conjuntamente (Carvalho *et al.*, 2002; Ambrósio *et al.*, 2024). Os escores do ideótipo para PROD e M100G foram aqueles associados aos maiores valores de média em cada safra. Já os escores do ideótipo para ARQ são aqueles que apresentaram menores valores médios de nota desse caráter. Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio dos recursos computacionais dos softwares R versão 4.4.0 (R Core Team, 2021) e GENES (Cruz, 2016).

3. RESULTADOS

O efeito de linhagens foi significativo ($p < 0,01$) para todos os caracteres nas análises individuais de variância (Tabela 1). As acurácias para PROD, M100G e ARQ foram iguais ou superiores a 0,80; 0,96 e 0,85, enquanto os CVs foram inferiores a 23,23%; 7,09% e 28,07%, respectivamente. As médias de PROD dos experimentos variaram de 1286,90 kg ha⁻¹ a 2846,57 kg ha⁻¹ enquanto para M100G houve uma variação de 45,81 a 51,61 g (Tabela 1). Já as médias de ARQ dos experimentos variaram de 4,41 a 5,31.

. O efeito da interação linhagens por ambientes (LxA) foi significativo ($P < 0,01$) para todos os caracteres (Tabela 2). A interação LxA para PROD apresentou natureza complexa, uma vez que as estimativas de correlação entre os pares de ambientes foram de baixa magnitude e a parte complexa desta interação (PC) foi superior a 50% (Tabela 3). Apesar da M100G ser um dos componentes da produção do feijoeiro, as estimativas de correlação entre os pares de ambientes foram superiores a 0,83 e os valores de PC inferiores a 46,25%. Tais resultados evidenciam que a natureza da interação LxA para M100G foi predominantemente de natureza simples.

Tabela 1 – Resumo das análises individuais de variância referentes à avaliação de linhagens de feijão de grãos especiais quanto a produtividade de grãos (PROD), massa de 100 grãos (M100G) e arquitetura de plantas (ARQ).

AMB ⁺	SAFRA	LOCAL	ANO	PROD				M100G				ARQ			
				QML ¹	Média	² r _{gg}	CV (%) ³	QML ¹	Média	² r _{gg}	CV (%) ³	QML ¹	Média	² r _{gg}	CVaj (%) ³
1	Águas	Coimbra	2019	724326,13**	2846,6	0,83	16,44	163,53**	51,61	0,99	3,18	-	-	-	-
2	Águas	Lavras	2020	530950,27**	1291,8	0,93	19,95	-	-	-	-	5,05**	5,31	0,89	28,05
3	Seca	Lavras	2020	233423,40**	2019,7	0,81	13,93	142,22**	45,81	0,98	5,7	8,26**	4,41	0,93	22,64
4	Seca	Lavras	2021	380200,22**	1286,9	0,90	20,19	154,48**	48,86	0,96	7,09	4,16**	5,21	0,89	24,04
5	Seca	Lavras	2023	341851,83**	2377,6	0,89	11,03	-	-	-	-	5,36**	4,68	0,85	28,07
6	Inverno	Lavras	2020	455680,30**	1707,8	0,80	23,23	-	-	-	-	4,46**	4,81	0,91	20,99
7	Inverno	Lavras	2021	532021,98**	1523,7	0,91	19,36	-	-	-	-	5,23**	5,06	0,90	25,13

⁺AMB:Ambientes;¹QML: Quadrado médio de linhagens; ²r_{gg}: acurácia seletiva; ³ Coeficientes de variação para M100G e PROD e ajustado para ARQ; **: Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: O autor (2025)

Tabela 2 – Resumo das análises conjuntas de variância das avaliações das 53 linhagens de feijão de grãos especiais quanto a produtividade de grãos (PROD), massa de 100 grãos (M100G), arquitetura de plantas (ARQ).

F.V. ¹	PROD		M100G		ARQ	
	GL ⁷	QM ⁸	GL	QM	GL	QM
Blocos/A ²	14	221975,68	6	36,79	12	4,85
Lin (L) ³	52	1435907,01**	52	404,69**	52	21,75**
Amb (A) ⁴	6	50854442,51**	2	1333,36**	5	18,43*
LxA ⁵	312	335026,56**	104	27,78**	260	2,15**
Resíduo	728	116258,320	312	7,18	624	1,03
Média		1917,53		48,76		4,91
CV (%) ⁶		17,77		5,49		24,88

¹FV: Fontes de variação; ² Blocos/A: Blocos dentro dos ambientes; ³Lin: Linhagens; ⁴Amb: Ambientes; ⁵LxA: Interação linhagens por ambientes; ⁶CV (%): Coeficientes de variação para M100G e PROD e ajustado para ARQ; ⁷GL: Graus de liberdade; ⁸QM: Quadrado médio; *, ** significativo a 5 e a 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

Fonte: O autor (2025)

Tabela 3 – Estimativas do coeficiente de correlação de Pearson e percentual da parte complexa (PC) da interação linhagens por pares de ambientes para os caracteres produtividade de grãos (PROD) e massa de 100 grãos (M100G).

AMB	1	2	3	4	5	6	7
1		0,47** (0,83)**	0,38* (0,85)**	0,44**	0,35*	0,41**	0,25 ^{ns}
2	70,72(41,44) ⁺		0,29 ^{ns} (0,97**)	0,36*	0,35**	0,54**	0,46 ^{ns}
3	62,21(38,16)	76,52(46,25)		0,37**	0,29**	0,19 ^{ns}	0,22*
4	64,59	76,81	78,15		0,32**	0,32**	0,29**
5	62,38	71,46	83,64	80,51		0,25*	0,37**
6	73,63	76,46	84,26	80,98	79,72		0,31**
7	80,51	72,14	85,57	83,43	75,26	8,97	

AMB – Ambientes: (1) Coimbra, Águas, 2019; (2) Lavras, Águas, 2020; (3) Lavras, Seca, 2020; (4) Lavras, Seca, 2021; (5) Lavras, Seca, 2023; (6) Lavras, Inverno, 2020; (7) Lavras, Inverno, 2021. ⁺: Valores entre parênteses representam o coeficiente de correlação de Pearson e o valor da parte complexa da interação linhagens por ambientes para M100G. A parte superior da diagonal principal representa valores de coeficiente de correlação de Pearson e a inferior representa percentual da parte complexa das linhagens por pares de ambiente. *, **: Significativo a 5 e a 1% de probabilidade pelo teste t.

Fonte: O autor (2025)

A interação LxA para ARQ foi predominantemente de natureza complexa, uma vez que as estimativas da correlação entre as médias das linhagens nos pares de ambientes variaram de 0,62 a 0,81 e os valores da PC em sua maioria superiores a 50% (Tabela 4). Entretanto, observou-se interação LxA de natureza simples em dois pares de ambientes (3 e 4; 4 e 6), que apresentaram correlações iguais ou superiores a 0,79 e percentuais da parte

complexa inferiores a 50%. Apesar disso, os resultados indicam uma predominância de natureza complexa da interação LxA para esse caráter.

Tabela 4 – Estimativas do coeficiente de correlação de Pearson e percentual da parte complexa da interação linhagens por pares de ambientes para arquitetura de planta (ARQ).

AMB	1	2	3	4	5	6
1		0,62**	0,64**	0,59**	0,41*	0,63**
2	61,85		0,48**	0,59**	0,71**	0,66**
3	59,66	71,84		0,79**	0,36**	0,68**
4	60,52	60,19	40,48		0,57**	0,81**
5	71,19	52,89	79,72	58,93		0,57**
6	59,67	58,01	56,61	35,73	65,72	

AMB – Ambientes: (1) Lavras, Águas, 2020; (2) Lavras, Seca, 2020; (3) Lavras, Seca, 2021; (4) Lavras, Seca, 2023; (5) Lavras, Inverno, 2020; (6) Lavras, Inverno, 2021; *: A parte superior da diagonal principal representa valores de coeficiente de correlação de Persson e a inferior representa percentual da parte complexa das linhagens por par de ambiente. *, **: Significativo a 5 e a 1% de probabilidade pelo teste t.

Fonte: O autor (2025)

A análise de fatores para PROD, ao utilizar três fatores, apresentou comunalidades com as avaliações para esse caráter entre 0,58 e 0,78, com uma comunalidade média igual a 0,69 (Tabela 5). O primeiro, segundo e terceiro fatores explicaram 44,73%; 13,34% e 10,93% da variação observada das linhagens quanto as avaliações de PROD, respectivamente (Figura 1). Observou-se tendência das avaliações de PROD realizadas em mesma safra apresentarem cargas fatoriais de elevada magnitude em um mesmo fator (Tabela 5). Por exemplo, as avaliações realizadas na safra da seca apresentaram cargas fatoriais elevadas no primeiro fator ($FA_1 \geq 0,62$), enquanto aquelas realizadas na safra das águas demonstraram maior carga fatorial no segundo fator ($FA_2 \geq 0,69$). No terceiro fator, observou-se cargas fatoriais mais elevadas para as avaliações de PROD na safra de inverno ($FA_3 \geq 0,57$).

Tabela 5 – Comunalidades (Co) e cargas fatoriais (FA) das avaliações quanto a produtividade de grãos (PROD), arquitetura de plantas (ARQ) e massa de 100 grãos (M100G) obtidas nas duas análises de fatores realizadas para PROD individualmente e ARQ e M100G conjuntamente.

AMB	SAFRA	LOCAL	ANO	PROD					ARQ e M100G			
				Car.	Co+	FA1 [#]	FA2 [#]	FA3 [#]	Car.	Co	FA1 [#]	FA2 [#]
1	Águas	Coimbra	2019	PROD	0,66	0,09	0,81	0,04	ARQ	-	-	-
2	Águas	Lavras	2020	PROD	0,61	0,20	0,69	0,32	ARQ	0,66	0,79	-0,19
3	Seca	Lavras	2020	PROD	0,71	0,62	0,57	-0,04	ARQ	0,78	0,88	-0,07
4	Seca	Lavras	2021	PROD	0,78	0,86	0,07	0,18	ARQ	0,53	0,73	0,07
5	Seca	Lavras	2023	PROD	0,72	0,69	0,2	0,45	ARQ	0,68	0,81	-0,12
6	Inverno	Lavras	2020	PROD	0,77	0,22	0,06	0,85	ARQ	0,79	0,88	-0,07
7	Inverno	Lavras	2021	PROD	0,58	0,12	0,5	0,57	ARQ	0,68	0,81	-0,12
1	Águas	Coimbra	2019	-	-	-	-	-	M100G	0,88	0	0,94
2	Águas	Lavras	2020	-	-	-	-	-	M100G	0,85	-0,01	0,92
3	Seca	Lavras	2020	-	-	-	-	-	M100G	0,88	0	0,94
Média					0,69	-	-	-		0,75		

⁺Co: comunalidades; [#]FA₁: carga fatorial do Fator 1; [#]FA₂: carga fatorial do Fator 2; [#]FA₃: carga fatorial do Fator 3 (para produtividade individualmente). ⁺Co: comunalidades; [#]FA₁: carga fatorial do Fator 1; [#]FA₂: carga fatorial do Fator 2 (ARQ e M100G conjuntamente).

Fonte: O autor (2025)

A análise de fatores realizada de forma conjunta para ARQ e M100G apresentou comunalidade média de 0,75 ao empregar somente dois fatores (Tabela 5). Essas comunalidades variaram de 0,53 a 0,79 para as avaliações de ARQ, enquanto para as avaliações de M100G foram iguais ou superiores a 0,85. Nessa análise, o primeiro e o segundo fatores explicaram 46,41% e 28,55% da variação das linhagens, respectivamente (Figura 2). As avaliações de ARQ e M100G apresentaram cargas fatoriais elevadas no primeiro (FA₁ ≥ 0,73) e segundo fatores (FA₂ ≥ 0,92), respectivamente (Tabela 5).

A linhagem Cacahuati Bola apresentou maior valor de escore do primeiro fator na análise de fatores para PROD, o que indica que essa linhagem se destacou na safra da seca (Figura 1A). Já a linhagem A195 foi a melhor na safra das águas, pois obteve maior valor de escore no segundo fator. Essa linhagem juntamente com o BRS Embaixador foram as duas que apresentaram menores distâncias em relação ao ideótipo para esses dois fatores, ou seja, destacaram-se quanto a PROD nas safras da seca e das águas. Ambas as linhagens também apresentaram menores distâncias em relação ao ideótipo para ARQ e M100G (Figuras 1 e 2).

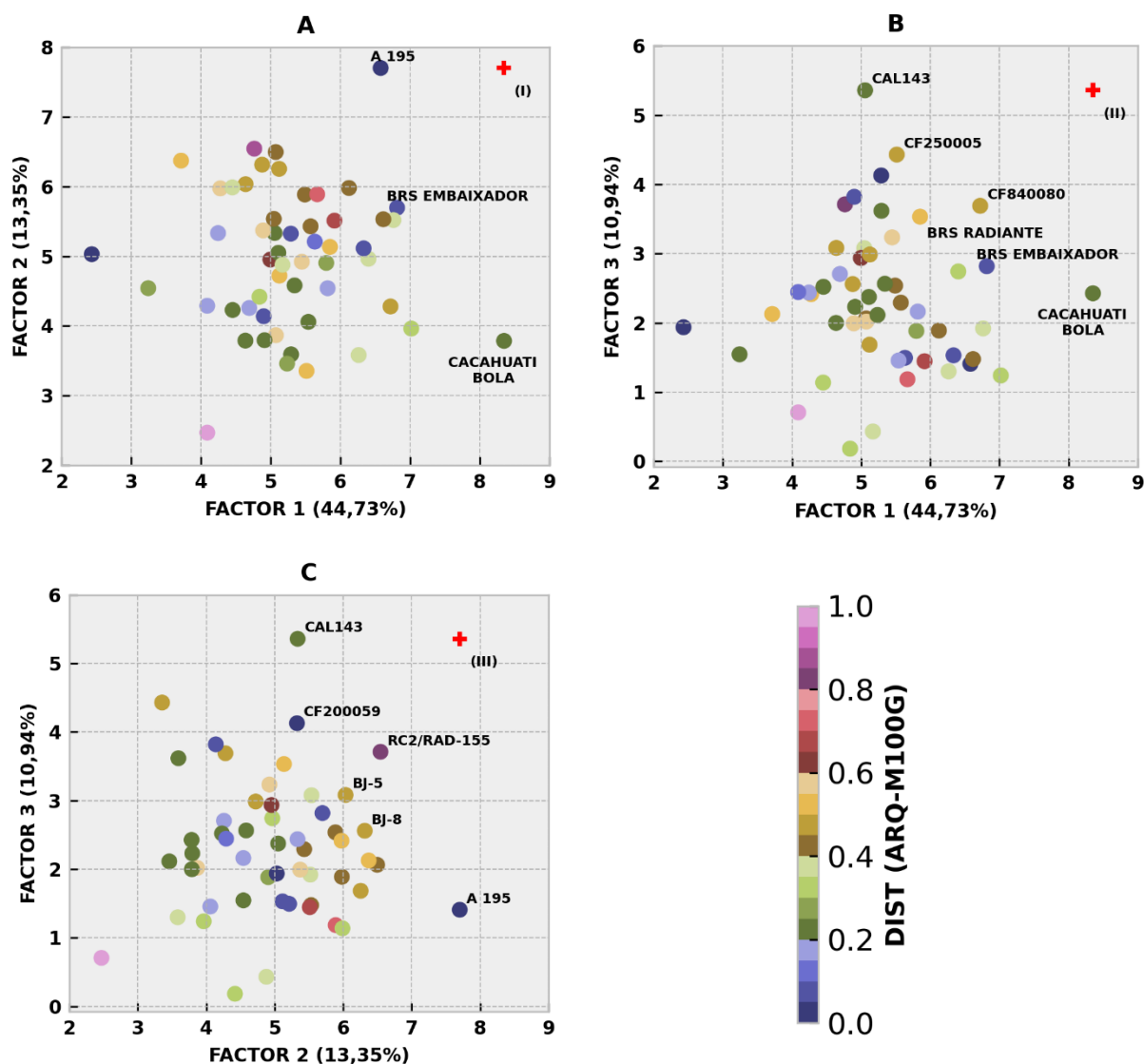


Figura 1: Gráficos biplots da dispersão dos escores das linhagens de feijões especiais nos fatores utilizados para representar a produtividade de grãos. (A) Gráfico biplot dos fatores 1 e 2; (B) Gráfico biplot dos fatores 1 e 3 e (C) Gráfico biplot dos fatores 2 e 3.

Fonte: O autor (2025)

A cultivar CAL 143 destacou-se quanto a PROD na safra de outono-inverno, pois apresentou maior valor de escore no terceiro fator da análise de fatores para PROD (Figura 1B). As cultivares BRS Radiante e BRS Embaixador e as linhagens CF 840080, CF 250005 e Cacahuati Bola foram as que apresentaram menores distâncias em relação ao ideótipo observado para o primeiro e terceiros fatores para PROD. Assim, tanto as linhagens quanto as cultivares destacaram-se para esse caráter nas safras da seca e do outono-inverno. Enquanto isso, a cultivar CAL 143 e as linhagens RC2/RAD-155, CF 200059, BJ-5 e BJ-8 apresentaram bom desempenho conjunto nas safras das águas e do inverno (Figura 1C). Dentre essas, a linhagem CF 200059 foi a que apresentou menor distância em relação ao ideótipo para ARQ e M100G. A cultivar BRS Executivo e a linhagem A 195 foram as que

mais se destacaram quanto a M100G e ARQ, respectivamente (Figura 2). A linhagem A 195 juntamente com as linhagens WAF 75, CF 200059, Hooter e as cultivares BRS Embaixador e IAC Boreal foram as que apresentaram menores distâncias em relação ao ideótipo para ARQ e M100G. Além disso, a cultivar BRS Embaixador foi a que apresentou menor distância em relação ao ideótipo para PROD nas diferentes safras. Essa cultivar juntamente com as linhagens CF200059, A 195, CAL 143 e a cultivar IAC Boreal foram as cinco com menores distâncias em relação aos ideótipo para PROD. ARQ e M100G de forma simultânea (Figuras 1 e 2).

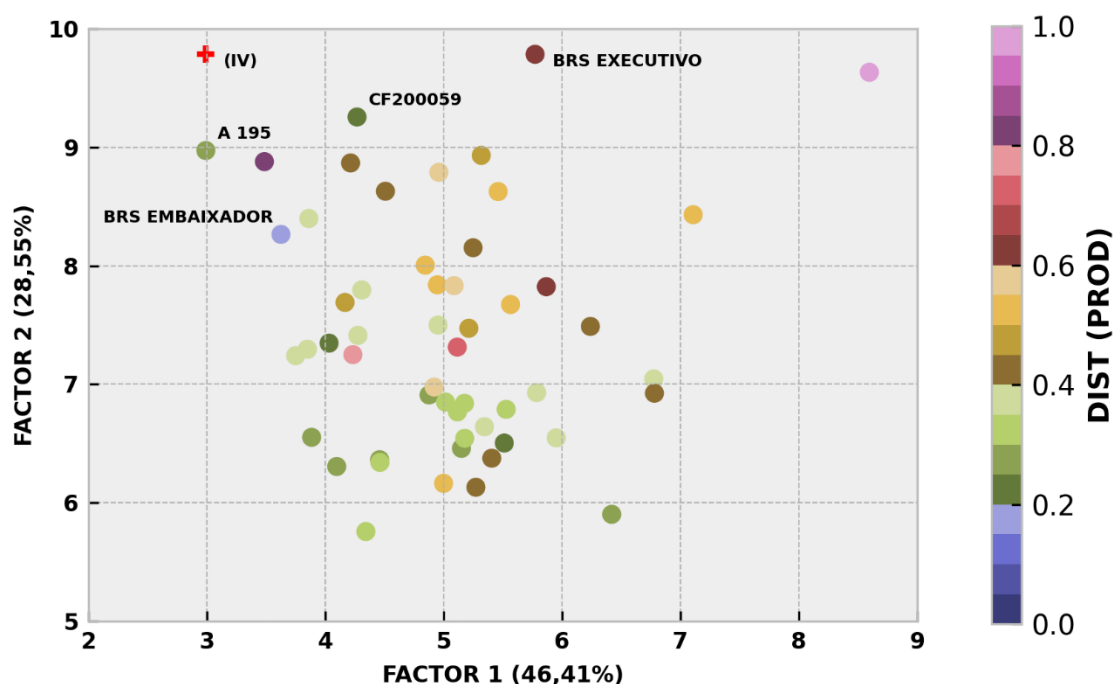


Figura 2: Gráficos biplots da dispersão dos escores das linhagens de feijões especiais nos fatores utilizados para representar arquitetura de plantas (ARQ) e massa de 100 grãos (M100G).

Fonte: O autor (2025).

4. DISCUSSÃO

Os resultados das análises individuais de variância evidenciaram que pelo menos uma das linhagens diferiu das demais quanto a PROD, M100G e ARQ (Tabela 1). Conforme Resende & Duarte. (2007), as avaliações desses caracteres apresentaram precisão experimental alta ou muito alta, uma vez que as estimativas das acurácias foram iguais ou superiores a 0,80. Os valores elevados de acurácia observados refletem que houve uma alta correlação entre os valores genotípicos verdadeiros das linhagens e aqueles obtidos nestes experimentos. Além disso, os CVs observados em todas as avaliações dos caracteres foram similares aos observados na literatura para cada caráter (Dias *et al.*, 2021; Ribeiro *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2021). Portanto, a elevada precisão experimental dessas avaliações permitiu uma acurada seleção de genitores de modo a orientar cruzamentos no melhoramento para feijões de grãos especiais.

As médias de PROD da maioria dos experimentos foram superiores à média brasileira da cultura, que é de 1676 kg ha⁻¹ (EMBRAPA, 2024). Nesses experimentos foram observadas linhagens com elevadas produtividades como CAL143 e A195, que apresentaram médias superiores a 2000 kg ha⁻¹. Experimentos de avaliação de linhagens de feijões de grãos especiais conduzidos em São Paulo e Santa Catarina, também apresentaram padrão similar (Pereira *et al.*, 2014; Ribeiro *et al.*, 2014; Ribeiro *et al.*, 2021). Porém, observou-se neste trabalho experimentos com média inferior à média nacional. Resultados similares também foram observados na literatura (Melo *et al.*, 2014). Essa baixa produtividade em alguns ambientes se deve à pouca adaptação de alguns genótipos para as condições brasileiras, pois ainda são poucos os programas que investem no melhoramento para esse padrão de feijão no Brasil (Ribeiro *et al.*, 2014; Chiorato *et al.*, 2018). Esses resultados demonstram a necessidade de empenho dos programas de melhoramento na obtenção de linhagens altamente produtivas e adaptadas às diferentes condições de cultivo no Brasil.

A maioria das linhagens avaliadas apresentaram grãos graúdos, uma vez que as médias de M100G variou de 45,80 a 51,60 g (Tabela 1). Destaca-se a cultivar BRS Executivo como potencial genitor visando o aumento da M100G (Figura 2). Pereira *et al.* (2014) e Ribeiro *et al.* (2014), também verificaram potenciais linhagens de feijões de grãos especiais com elevada M100G. A seleção de linhagens com esse fenótipo é de grande importância pois uma das principais demandas do mercado nacional e internacional é que as novas cultivares de feijões de grãos especiais devem apresentar grãos de maior tamanho.

Apesar das notas médias dos experimentos quanto a ARQ variarem de 4,41 a 5,31 (Tabela 1), observou-se linhagens com médias abaixo de 3. Exemplo de destaque quanto a

esse caráter é a linhagem A195, que apresentou notas de ARQ iguais ou inferiores a 3,67 e foi a que mais se destacou quanto a esse caráter na análise de fatores considerando as diferentes safras (Figura 2). Esses atributos são importantes pois cultivares com esses fenótipos permitem menores perdas com a colheita mecanizada, facilita os tratos culturais e permite a maior circulação de ar nas entrelinhas da cultura de modo a reduzir disseminação de patógenos como o causador do mofo-branco (Pires *et al.*, 2014; Ribeiro *et al.*, 2024; Moura *et al.*, 2018). Além disso, essas cultivares possibilitam a obtenção de grãos de melhor qualidade, uma vez que reduz o contato das vagens com o solo úmido quando a colheita coincide com longos períodos chuvosos (Barili *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2019; Ribeiro *et al.*, 2024).

As linhagens demonstraram comportamento inconsistente mediante as variações ambientais para todos os caracteres, em especial para PROD e ARQ (Tabelas 2, 3 e 4). Essa interação LxA se deve a expressão diferencial dos genes conforme as diferentes condições ambientais as quais as linhagens foram submetidas (Oliveira *et al.*, 2005; Cruz *et al.* 2012; Van Eeuwijk *et al.*, 2016; Pereira *et al.*, 2017). Os caracteres PROD e ARQ demonstraram interação LxA de natureza complexa, enquanto a M100G apresentou interação de natureza simples. O emprego da análise de fatores permitiu incorporar essa interação LxA na seleção de genitores e orientação dos cruzamentos de linhagens de feijões especiais visando iniciar um programa de melhoramento.

A seleção de genitores visando ARQ e M100G não se demonstrou de difícil realização uma vez que todas as avaliações de um mesmo caráter apresentaram cargas fatoriais elevadas com um mesmo fator. Portanto, a análise de fatores para esses caracteres permitiu utilizar os escores do primeiro fator para selecionar as linhagens quanto a ARQ em multi-ambientes, enquanto os escores do segundo fator foram utilizados para seleção quanto a M100G (Tabela 5). A linhagem A 195 destacou-se para ambos os caracteres, que a qualifica como um potencial genitor. Entretanto, verificou-se que a cultivar BRS Executivo foi identificada como um potencial genitor somente para M100G. Observada essas particularidades da análise de fatores, constatou-se que se deve selecionar tanto as linhagens que se destacam para ambos os caracteres como também aquelas que são as melhores para um único caráter. A seleção para ambos os caracteres em simultâneo deve ser realizada com base no índice genótipo ideótipo associado aos escores da análise de fatores (Mencalha *et al.*, 2024; Rocha *et al.*, 2018). Já a seleção de genitores para cada caráter individualmente pode ser realizada com base em cada fator individualmente. Essa estratégia permitirá reunir os

alelos favoráveis que estão dispersos em diferentes linhagens, que é o fundamento da estratégia de hibridação (Ramalho et al., 2024).

A seleção dos genitores quanto a M100G e ARQ considerando a interação LxA não foi tão complexa quanto a realizada para produtividade de grãos, na qual a interação LxA foi evidenciada pelas baixas estimativas de correlação entre médias desse caráter nos pares de ambientes e pelos valores de PC superiores a 50% (Tabela 3). Condições edafoclimáticas como variações de temperatura e disponibilidade hídrica de cada safra foram determinantes na resposta diferencial das linhagens quanto a PROD. Neste trabalho foram observadas condições bastante distintas entre os experimentos conduzidos, uma vez que estes foram implantados nas três safras de cultivo (seca, inverno e águas), durante os anos de 2019 a 2023 nos municípios de Lavras e Coimbra (INMET, 2024). Os resultados observados neste trabalho sobre a influência da interação LxA no feijoeiro e os descritos na literatura para produtividade de grãos (Lima *et al.*, 2014; Pereira *et al.*, 2017) e arquitetura de plantas (Barili *et al.*, 2016; Pires *et al.*, 2014) demonstram a importância desse componente no melhoramento do feijoeiro. Oliveira *et al.* (2005), verificaram resultado similar a este trabalho ao observar elevada carga fatorial das avaliações de PROD com um mesmo fator na análise de fatores, que indica maior semelhança no ranqueamento das linhagens avaliadas em uma mesma safra. Esses resultados demonstram a maior influência da interação linhagens por safras no valor fenotípico das linhagens.

A seleção de genitores quanto a PROD deve considerar as linhagens que apresentem ampla adaptabilidade assim como aquelas que se destaquem em condições específicas de safras. Essa estratégia permitirá reunir nas linhagens tanto alelos que se expressam em qualquer condição ambiental como também aqueles diferencialmente expressos ao longo das safras. A análise de fatores demonstrou ser uma estratégia viável quando o objetivo é a seleção de genitores para PROD, pois permitiu identificar aquelas que se destacam em cada safra como também aquelas que apresentam ampla adaptabilidade. A identificação da linhagem com ampla adaptabilidade foi possível de ser realizada por meio da combinação dos escores da análise de fatores com o índice genótipo ideótipo.

A BRS Embaixador é um exemplo de cultivar com ampla adaptabilidade para PROD (Figura 1), pois apresentou menor distância em relação ao ideótipo nas diferentes safras. Já as linhagens Cacahuati bola, A195 e a linhagem Cal143 foram identificadas na análise de fatores como as melhores quanto a PROD nas safras da seca, águas e inverno, respectivamente (Figura 1). Portanto, essas devem também ser utilizadas como genitoras, porém em cruzamentos também orientados pela análise de fatores. Assim, recomenda-se que

linhagens que se destacam em uma safra sejam cruzadas com outras que se destacam em safras diferentes, de modo a permitir obter linhagens com alelos que se expressam em diferentes condições ambientais.

Apesar da importância da interação LxA, essa não tem sido considerada nas etapas iniciais dos programas de melhoramento, em especial na escolha de genitores e na orientação dos cruzamentos. A seleção de genitores baseada no desempenho per se muitas vezes é realizada com base em um ou poucos experimentos devido à dificuldade na disponibilidade de área e financeira para realização dos experimentos em locais, anos e safras diferentes. Isso pode ser um dos motivos pela menor magnitude dos ganhos genéticos nos programas de melhoramento do feijoeiro ao longo do tempo (Ribeiro *et al.*, 2023; Ribeiro *et al.*, 2024). Por isso, o emprego da análise de fatores para auxiliar na seleção dos genitores e na orientação dos cruzamentos se torna importante para que os programas de melhoramento do feijoeiro sejam eficientes na recomendação de cultivares com adaptação às diferentes condições de cultivo.

5. CONCLUSÃO

A análise de fatores permitiu identificar linhagens de feijão de grãos especiais para produtividade de grãos com ampla adaptabilidade ou específica para cada safra de cultivo. Além disso, permitiu incorporar avaliações quanto a massa de 100 grãos e arquitetura de plantas em diferentes safras na seleção de genitores. Assim, essa metodologia demonstrou ser uma estratégia viável e prática tanto para selecionar genitores visando diferentes caracteres avaliados em diferentes safras quanto para orientar os cruzamentos nos programas de melhoramento do feijoeiro. Por meio dessa metodologia, verificou-se que as linhagens A 195, Cacahuati Bola, BRS Embaixador, CF200059, IAC Boreal e a cultivar CAL 143 tem potencial para serem utilizadas como genitoras em programas de melhoramento de feijões de grãos especiais por apresentarem elevada produtividade de grãos, plantas com arquitetura ereta e grãos graúdos.

TERCEIRA PARTE

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciam a relevância da caracterização fenotípica e da análise multi-caracter no processo de seleção de genitores em programas de melhoramento genético do feijoeiro, com ênfase em grãos especiais. O estudo foi estruturado em duas abordagens complementares que, de forma integrada, proporcionaram avanços significativos na identificação de linhagens promissoras e no aprimoramento das estratégias de seleção.

A primeira etapa do estudo concentrou-se na caracterização fenotípica de linhagens com base em atributos físicos dos grãos, por meio de tecnologias baseadas em análise de imagens digitais. Essa abordagem possibilitou mensurações objetivas, rápidas e precisas de características físicas, como comprimento (CP), largura (LG), área (AR) e coeficiente J, além de atributos relacionados à cor, representados pelas modas dos canais L, a e b* do sistema CIE Lab, evidenciando ampla variabilidade entre as linhagens avaliadas. As informações geradas são essenciais para a seleção de genitores com características desejáveis, em conformidade com as exigências dos mercados nacional e internacional.

O segundo estudo priorizou a avaliação de linhagens em diferentes ambientes e épocas de cultivo quanto a produtividade de grãos, massa de 100 grãos e arquitetura de planta. A adoção de estratégias multicaracterísticas, aliada à análise fatorial, permitiu a identificação de linhagens com elevado desempenho produtivo, ampla adaptabilidade, estabilidade fenotípica e arquitetura ereta, atributos fundamentais para o cultivo mecanizado e a adoção de práticas agrícolas mais eficientes. Os resultados obtidos contribuíram para orientar a definição e seleção precisa de genitores, bem como para o planejamento de cruzamentos mais promissores.

De modo geral, os dois estudos evidenciaram o potencial de diversas linhagens sob os aspectos agrônomo e comercial, demonstrando que a adoção de metodologias modernas, como a análise de imagens e a avaliação multicaracterística, fortalece a capacidade de tomada de decisão nos programas de melhoramento genético. As informações geradas oferecem suporte técnico-científico ao desenvolvimento de novas cultivares de feijões especiais, mais produtivas, adaptadas às condições edafoclimáticas brasileiras e com elevado potencial de aceitação no mercado internacional.

7. REFERÊNCIAS

Aguilera, J. G., Ribeiro, E. B. E., do Nascimento, A. C. V., Silva, M. V., dos Santos Carvalho, R., Cocco, A. S. & Bardivieso, D. M. (2023). **Qualitative and quantitative descriptors for quantifying the genetic diversity of bean seeds.** *Trends in Agricultural and Environmental Sciences*, e230001-e230001.

Alves, A. F., Menezes Júnior, J. Â. N. D., Menezes, V. M. P. S., Carneiro, J. E. D. S., Carneiro, P. C. S., & Alves, A. F. (2015). **Progresso genético e potencial de famílias de feijão carioca obtidas por meio de seleção recorrente.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 15, 218-226.

Ambrósio, M., Daher, R. F., Santos, R. M., Santana, J. G. S., Vidal, A. K. F., Nascimento, M. R., ... & Dos Santos, P. R. (2024). **Multi-trait index: selection and recommendation of superior black bean genotypes as new improved varieties.** *BMC Plant Biology*, 24(1), 525.

Arruda, I. M., Moda-Cirino, V., Koltun, A., Zeffa, D. M., Nagashima, G. T., & Gonçalves, L. S. A. (2019). **Combining ability for agromorphological and physiological traits in different gene pools of common bean subjected to water deficit.** *Agronomy*, 9(7), 371.

Barili, L. D., Vale, N. M., Moura, L. M., Paula, R. G., Silva, F. F., & Carneiro, J. E. S. (2016). **Genetic progress resulting from forty-three years of breeding of the carioca common bean in Brazil.** *Genetics and Molecular Research*, 15(3), 1-11.

Borém, A., Miranda, G. V., & Fritsche-Neto, R. (2021). **Melhoramento de plantas.** – ISBN: 9788572695671 8. Ed. Viçosa. MG: Editora UFV. 2017. 113 p.

Broughton, W. J., Hernandez, G., Blair, M., Beebe, S., Gepts, P., & Vanderleyden, J. (2003). **Beans (*Phaseolus spp.*) –model food legumes.** *Plant and soil*, 252,55-128.

Carbonell, S. A. M., Chiorato, A. F., Bezerra, L. M. C., Gonçalves, J. G. R., Silva, D. A. D., Esteves, J. A. D. F., & Gallo, P. B. (2020). **IAC Nuance and IAC Tigre: common bean cultivars for special markets.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 20, e26732035.

Carneiro, J. D. S., Paula Júnior, T. D., & Borém, A. (2015). **Feijão: do plantio à colheita.** *UFV, Viçosa*, 384p, 410.

Cerutti, P. H., Grigolo, S., Melo, R. C. D., Fioreze, A. C. D. C. L., Guidolin, A. F., & Coimbra, J. L. M. (2020). **Combining ability between common bean gene groups for root distribution trait.** *Ciência e Agrotecnologia*, 44, e011520.

Cavalcante, A. G., Lemos, L. B., Meirelles, F. C., Filla, V. A., Cavalcante, A. C. P., & de Aquino, L. A. (2021). **Agronomic and qualitative performance of some special grain bean cultivars.** *Australian Journal of Crop Science*, 15(7), 990-996.

Chiorato, A. F., Reis, L. L. B., Bezerra, L. M. C., & Carbonell, S. A. M. (2018). **Global vision on common bean breeding cultivars.** *Phaseolus vulgaris: cultivars production and uses*, 27-68.

Collicchio, E., Ramalho, M. A. P., & Abreu, Â. D. F. B. (1997). **Associação entre o porte da planta do feijoeiro e o tamanho dos grãos.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 32(3), 297-304.

Conab, C. N. D. A. (2023). **Acompanhamento da safra brasileira de café.** *CONAB: Brasília, Brazil*, 10.

Costa, L. C., Ramalho, M. A., Abreu, Â. F., & Souza, E. A. (2024). **Recurrent selection for broad-spectrum resistance to anthracnose in common bean.** *Crop Science*, 64(6), 3073-3085.

CRUZ, C. D., & CASTOLDI, F. L. (1991). **Decomposição da interação genótipos x ambientes em partes simples e complexa.** *Revista Ceres*, 38(219).

Cruz, C. D. (2016). Genes Software-extended and integrated with R, MATLAB, and Selegen. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 38(4), 547-552. Cruz, C. D., Carneiro, P. C. S., & Regazzi, A. J. (2014). **Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético** (E. UFV (ed.); 3a ed.).

Cruz CD, Regazzi AJ and Carneiro PCS (2012) **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético.** Ed. UFV, Viçosa, 253p.

de Carvalho, C. G. P., Cruz, C. D., Viana, J. M. S., & da Silva, D. J. H. (2002). **Selection based on distances from ideotype.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 2(2).

De Ron, A. M., González, A. M., Rodiño, A. P., Santalla, M., Godoy, L., & Papa, R. (2016). **História del cultivo de la judía: su evolución más allá de las áreas de origen y domesticación.** *Arbor*, 192(779), a317-a317.

Dias, P. A. S., Almeida, D. V., Melo, P. G. S., Pereira, H. S., & Melo, L. C. (2021). **Effectiveness of breeding selection for grain quality in common bean.** *Crop Science*, 61(2), 1127-1140.

Dos Anjos, R. S., Marçal, T. D. S., Carneiro, P. C., & Carneiro, J. E. D. S. (2019). **New proposals to estimate unbiased selection gain and coefficient of variation in traits evaluated using score scales.** *Crop Science*, 59(3), 937-944.

EMBRAPA. Socioeconomia. *Embrapa Arroz e Feijão*, 2023. Acesso em: 17 dez. 2024.

FAOSTAT. (2024). **Production quantities of beans.** <https://www.fao.org/faostat/>.

Gandhi, M. T., Sharma, M., Patel, M. P., Soni, N. V., & Dave, G. S. (2024). **Unearthing hybridization opportunities for augmenting biomass yield and harvest index in rajmash (*Phaseolus vulgaris* L.).** *Journal of Food Legumes*, 37(1), 34-39.

Gepts, P., & Debouck, D. (1991). **Origin, domestication, and evolution of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.).** *Common beans: research for crop improvement*, 7-53.

Gonçalves, J. G. R., Silva, D. A. D., Chiorato, A. F., Rovaris, S. R. S., Gonçalves, G. D. M. C., & Carbonell, S. A. M. (2024). **Combining ability of common bean in a complete diallel cross under water deficit.** *Bragantia*, 83, e20230172.

INMET. (2024). **Dados meteorológico-banco de dados.** <https://bdmep.inmet.gov.br/>

Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2002). **Applied multivariate statistical analysis.**

Júnior, I. C. V., Berchembrock, Y. V., & Pádua, J. M. V. (2024). **Strategies for recurrent selection programs aiming upright common bean plants.**

Kepildek, R., & Ceyhan, E. (2021). **Determination of some agronomic traits of fresh bean parents and hybrids and their heritability with diallel analysis method.** *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 35(2), 71-82.

Lima, L. K. D., Ramalho, M. A. P., Abreu, Â. D. F. B., Toledo, F. H. R. B., & Ferreira, R. A. D. C. (2014). **Implications of predictable and unpredictable environmental factors in common bean VCU trials in Minas Gerais.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 14, 146-153.

Melo, L. C., Abreu, Â. D. F. B., Ramalho, M. A. P., Carneiro, J. E. D. S., Paula Júnior, T. J. D., Del Peloso, M. J., ... & Faria, J. C. D. (2014). **BRSMG Realce: Common bean cultivar with striped grains for the state of Minas Gerais.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 14, 61-64.

Mencalha, J., Dias, M. A., de Souza, E. A., Carneiro, P. C. S., Carneiro, V. Q., & Carneiro, J. E. D. S. (2022). **Potential parents of carioca bean for use in breeding aiming resistance to *Colletotrichum lindemuthianum***. *Agronomy Journal*, 114(4), 2159-2168.

Mencalha, J., Dias, M. A., de Souza, E. A., Carneiro, V. Q., Carneiro, P. C. S., & de Souza Carneiro, J. E. (2024). **Factor analysis applied to simultaneous selection for resistance to anthracnose and angular leaf spot**. *Crop Science*, 64(5), 2725-2735.

Moura, L. M., Carneiro, P. C. S., Vale, N. M., Barili, L. D., Silva, L. C., Carneiro, J. E. S., & Cruz, C. D. (2016). **Diallel analysis to choose parents for black bean (*Phaseolus vulgaris* L.) breeding**.

Moura, L. M., dos Anjos, R. S. R., Batista, R. O., do Vale, N. M., Cruz, C. D., Carneiro, J. E. D. S., & Carneiro, P. C. S. (2018). **Combining ability of common bean parents in different seasons, locations, and generations**. *Euphytica*, 214, 1-13.

Nadeem, M. A., Yeken, M. Z., Shahid, M. Q., Habyarimana, E., Yılmaz, H., Alsaleh, A., & Baloch, F. S. (2021). **Common bean as a potential crop for future food security: an overview of past, current, and future contributions in genomics, transcriptomics, transgenics, and proteomics**. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 35(1), 759-787.

Oliveira, G. V., de Souza Carneiro, P. C., dos Santos Dias, L. A., de Souza Carneiro, J. E., & Cruz, C. D. (2005). **Factor analysis in the environment stratification for the evaluation of common bean cultivars**. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 5(2).

Olivoto, T. et al. Mean performance and stability in multi-environment trials II: **Selection based on multiple traits**. *Agronomy Journal*, v. 111, n. 6, p. 2961–2969, 2019.

Parker, T. A., & Gepts, P. (2021). **Population genomics of *Phaseolus* spp.:** A domestication hotspot. In *Population genomics: Crop plants* (pp. 607-689). Cham: Springer International Publishing.

Pereira, H. S., Alvares, R. C., de Cássia Silva, F., de Faria, L. C., & Melo, L. C. (2017). **Genetic, environmental, and genotype x environment interaction effects on the common bean grain yield and commercial quality**. *Semina: Ciências Agrárias*, 38(3), 1241-1250.

Pereira, H. S., Bueno, L. G., Del Peloso, M. J., Abreu, A. D. F. B., Moreira, J. A. A., Martins, M., . & Melo, L. C. (2014). **Agronomic performance and stability of andean common bean lines with white grains in Brazil**. *Bragantia*, 73, 130-137.

Pereira, H. S., Melo, L. C., de SOUZA, T. L. P. O., de Faria, L. C., Del Peloso, M. J., de Aguiar, M. S., ... & de Souza, N. P. (2019). **BRS FS305: cultivar de feijão para exportação com grãos calima**. *Comunicado técnico*, (250).

Pires, L. P. M., Ramalho, M. A. P., Abreu, Â. D. F. B., & Ferreira, M. C. (2014). **Recurrent mass selection for upright plant architecture in common bean.** *Scientia Agricola*, 71, 240-243.

R Core Team. (2021). *R: A Language and Environment for statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing.

Ramalho MAP, Nunes JAR, Pádua JMV, Tolero FHB (2024) **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas.** *Universidade Federal de Lavras, Lavras* 456p.

Resende, M. D. V., & Duarte, J. B. (2007). **Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares.** *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 182-194.

Ribeiro, N. D., Dos Santos, G. G., & De Andrade, F. F. (2024). **Enhancing agronomic performance through genetic improvement of key traits in newly developed common bean cultivars cultivated in southern Brazil.** *Euphytica*, 220(1), 1.

Ribeiro, N. D., Kläsener, G. R., Somavilla, I. P., & Santos, G. D. (2019). **Upright plant architecture traits and their relationship with grain yield in the selection of Mesoamerican common bean lines cultivated at low altitude.** *Genetics and Molecular Research*, 18(2), 1-13.

Ribeiro, N. D., Maziero, S. M., & Argenta, H. D. S. (2023). **Genetic gain for technological traits in new cultivars developed by the Southern Brazilian common-bean network.** *Ciência e Agrotecnologia*, 47, e019322.

Ribeiro, N. D., Mezzomo, H. C., & Kläsener, G. R. (2021). **Genetic parameters and selection of micromineral-biofortified Andean bean lines with high technological quality.** *Semina: Ciências Agrárias*, 42(2), 517-538.

Ribeiro, N. D., Rodrigues, J. D. A., Prigol, M., Nogueira, C. W., Storck, L., & Gruhn, E. M. (2014). **Evaluation of special grains bean lines for grain yield, cooking time, and mineral concentrations.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 14, 15-22.

Rocha, J. R. D. A. S. D. C., Machado, J. C., & Carneiro, P. C. S. (2018). **Multitrait index based on factor analysis and ideotype-design: Proposal and application on elephant grass breeding for bioenergy.** *Gcb Bioenergy*, 10(1), 52-60.

Rodrigues, A. P. S., de Oliveira, T. C., Oliveira, A. J., dos Santos, A. A. C., da Silva Almici, M., da Silva, V. P., ... & Barelli, M. A. A. (2021). **Caracterização morfoagronômica de**

genótipos de feijoeiro comum quanto à precocidade. *Research, Society and Development*, 10(6), e35410615951-e35410615951.

Silva, V. M. P., Menezes Júnior, J. A. N., Carneiro, P. C. S., Carneiro, J., & Cruz, C. D. (2013). **Genetic improvement of plant architecture in the common bean.** *Genetics and Molecular Research*, 12(3), 3093-3102.

Van Eeuwijk, F. A., Bustos-Korts, D. V., & Malosetti, M. (2016). **What should students in plant breeding know about the statistical aspects of genotype× environment interactions?.** *Crop Science*, 56(5), 2119-2140.

Vieira Júnior, I. C., Berchembrock, Y. V., & Pádua, J. M. V. (2024). **Strategies for recurrent selection programs aiming upright common bean plants.** *Euphytica*, 220(12), 1-9.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela S1– Cor dos grãos e grupo comercial das linhagens/cultivares de feijão de grãos especiais avaliados em sete ambientes, envolvendo locais, anos e safras.

Nº	Linhagens/Cultivares	Grupo Comercial	Nº	Linhagens/Cultivares	Grupo Comercial
1	BRS Embaixador	Dark Red Kidney	28	BJ-3	Jalo
2	CFE 46	Light red kidney	29	BJ-7	Jalo
3	Montcalm	Light red kidney	30	RAD/E550-284	Jalo
4	Vermelho-1	Light red kidney	31	BJ-8	Jalo
5	Vermelhão	Light red kidney	32	Novo Jalo	Jalo
6	CF 240114	Dark Red Kidney	33	BJ-5	Jalo
7	CF 250005	Dark Red Kidney	34	CF 840080	Cranberry
8	CF 250015	Dark Red Kidney	35	RC2/RAD-155	Cranberry
9	Light Red Kidney	Light red kidney	36	Pintado Bolinha	Cranberry
10	CF 840070	Light red kidney	37	CNFRJ 10571	Cranberry
11	Feijão Sopa	Light red kidney	38	Cacahuati Bola	Cranberry
12	Red Kanner	Light red kidney	39	BRS Executivo	Cranberry
13	Chinook	Light red kidney	40	CF 870840	Cranberry
14	CF 250007	Light red kidney	41	CNFRJ 10556	Cranberry
15	CF 230023	Light red kidney	42	CF 800151	Cranberry
16	Kabon	Branco	43	CNFRJ 10564	Cranberry
17	IPR Garça	Branco	44	Pintado	Cranberry
18	WAF 141	Branco	45	IAC Harmonia	Cranberry
19	Ouro Branco	Branco	46	Tico Tico	Cranberry
20	Ouro Graudo	Branco	47	Iraí	Cranberry
21	WAF 75	Branco	48	BRS Realce	Cranberry
22	CF 200059	Calima	49	Carnaval	Cranberry
23	Cal 143	Calima	50	Cacahuati 72	Cranberry
24	IAC Boreal	Calima	51	BRS Radiante	Cranberry
25	CF 250013	Calima	52	Hooter	Cranberry
26	A 195	Manteigão(Mulatinho)	53	CF 900003	Cranberry
27	Manteigão Fosco11	Manteigão(Mulatinho)			

Fonte: O autor (2025)

Tabela S2 – Local, safra e ano de condução dos 7 experimentos de avaliação das 53 linhagens de feijão de grãos especiais.

AMBIENTES	LOCAL	SAFRA	ANO
1	Coimbra	Águas	2019
2	Lavras	Águas	2020
3	Lavras	Seca	2020
4	Lavras	Seca	2021
5	Lavras	Seca	2023
6	Lavras	Inverno	2020
7	Lavras	Inverno	2021

Fonte: O autor (2025)