

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Análise multi-informação para adaptabilidade e estabilidade fenotípica em
linhagens de feijão**

Gabriela Inez de Andrade Rocha
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

GABRIELA INEZ DE ANDRADE ROCHA

**Análise multi-informação para adaptabilidade e estabilidade fenotípica em
linhagens de feijão**

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

Orientador: Leonardo Lopes Bhering

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

R672a
2026

Rocha, Gabriela Inez Andrade, 1997-
Análise multi-informação para adaptabilidade e estabilidade
fenotípica em linhagens de feijão / Gabriela Inez Andrade
Rocha. – Viçosa, MG, 2026.
1 dissertação eletrônica (54 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Leonardo Lopes Bhering.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Biologia Geral, 2026.
Referências bibliográficas: f. 48-54.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.506>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Feijão - Melhoramento genético. 2. Interação
genótipo-ambiente. I. Bhering, Leonardo Lopes, 1980-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Biologia
Geral. Programa de Pós-Graduação em Genética e
Melhoramento. III. Título.

CDD 22. ed. 633.37223

GABRIELA INEZ DE ANDRADE ROCHA

**Análise multi-informação para adaptabilidade e estabilidade fenotípica em
linhagens de feijão**

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

APROVADA: 3 de julho de 2026.

Assentimento:

Gabriela Inez de Andrade Rocha
Autora

Leonardo Lopes Bhering
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 03/09/2026 às 16:32:17 e pelo orientador em 03/09/2026 às 16:57:17. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **OZHM.UEKN.HAWU** e clique no botão 'Validar documento'.

À Deus, pela vida, saúde e força ao longo dessa caminhada.
À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos.
À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, pela oportunidade de realização do curso.
Ao Prof. Dr. Leonardo Lopes Bhering, pela orientação, confiança, ensinamentos, compreensão e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho.
Aos meus pais, Evandro de Oliveira Rocha e Célia Maria de Andrade Rocha, por serem meu maior exemplo de força, honestidade e perseverança. Nada disso seria possível sem o amor incondicional, o apoio constante e os ensinamentos que me trouxeram até aqui.
Ao meu irmão, Guilherme Thadeu de Andrade Rocha, pelo carinho, incentivo, amizade e por estar ao meu lado em todos os momentos, tornando esta jornada mais leve e especial.
Aos meus familiares em geral, pelo apoio, incentivo e por acreditarem em mim em todos os momentos.
Aos colegas do laboratório de Biometria e do programa de Genética e Melhoramento UFV, pelo companheirismo e pelas trocas de experiências ao longo dessa jornada.
A todos os que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Carregamos em nós aquilo que nos constitui, mas é no encontro com diferentes ambientes que revelamos quem podemos nos tornar. Alguns caminhos favorecem, outros desafiam; alguns exigem mudança, outros nos ensinam a permanecer. E, assim como na natureza, é na interação entre o que somos e as condições que encontramos que surgem diferentes respostas. Ao final, crescer talvez seja justamente isso: aprender a atravessar ambientes distintos sem perder a essência, transformando cada desafio em possibilidade de adaptação, aprendizado e evolução.

— Autoria própria

RESUMO

ROCHA, Gabriela Inez de Andrade, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2026. **Análise multi-informação para adaptabilidade e estabilidade fenotípica em linhagens de feijão.** Orientador: Leonardo Lopes Bhering.

O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma das principais culturas alimentares no Brasil, cultivado sob grande diversidade ambiental e de manejos, o que expõe o germoplasma a uma expressiva interação genótipos $\times$ ambientes (G $\times$ A). Essa interação dificulta o processo de seleção e recomendação com base apenas em médias gerais de rendimento. Diante desse desafio, este estudo teve como objetivo avaliar a adaptabilidade e a estabilidade de genótipos de feijoeiro quanto à produtividade de grãos utilizando a análise multi-informação como estratégia integrativa pioneira. Foram avaliados 11 genótipos (as linhagens CNFP16459, CNFP16416, CNFP16379, CNFP16404, CNFP16383, CNFP16380, CNFP16384 e as cultivares comerciais BRS Esteio, BRS FP403, IPR Tuiuiú e IPR Uirapuru) em 10 ambientes do território nacional na safra das águas de 2018 (Anápolis - GO, Araucária - PR, Criciúma - SC, Formosa - GO, Holambra - SP, Londrina - PR, Planaltina - DF, Prudentópolis - PR, Rio Verde - GO e Sete Lagoas - MG). Diferenciando-se das abordagens tradicionais de recomendação baseadas na aplicação isolada e sequencial de métodos, este estudo utilizou a análise multi-informação para realizar um procedimento analítico inverso: elegendo previamente os genótipos de maior interesse agrônomo para, em seguida, consolidar parâmetros de potencial produtivo, plasticidade, previsibilidade e estabilidade em uma ficha de desempenho única (meta-análise). Para a estruturação dessa análise, integraram-se os resultados de métodos clássicos baseados em decomposição da variância (Plaisted & Peterson, Wricke e Shukla), modelos de regressão (Finlay & Wilkinson, Eberhart & Russell, Tai e regressão bissegmentada), medidas de superioridade e risco (Lin & Binns, Annicchiarico e Centroides). Os resultados revelaram uma interação G $\times$ A altamente significativa e de natureza predominantemente complexa (superior a 90% das interações significativas), evidenciando alterações severas no ranqueamento relativo dos genótipos nos locais de cultivo. A estratificação ambiental dividiu os locais de teste entre desfavoráveis (Sete Lagoas, Londrina, Criciúma, Rio Verde e Prudentópolis) e favoráveis (Anápolis, Planaltina, Araucária, Holambra e Formosa). A síntese proporcionada pela análise de multi-informação permitiu estabelecer recomendações altamente seguras e regionalizadas: as linhagens CNFP16459 e CNFP16383 apresentaram ampla adaptabilidade

e

previsibilidade comportamental, sendo indicadas para recomendação geral; os materiais CNFP16384, CNFP16404 e CNFP16416, dotados de elevado teto produtivo e sensibilidade ambiental positiva, foram recomendados para ambientes favoráveis; as cultivares comerciais BRS FP403 e IPR Tuiuiú destacaram-se pela rusticidade e estabilidade temporal, sendo direcionadas para ambientes desfavoráveis; e os genótipos CNFP16380, CNFP16379, BRS Esteio e IPR Uirapuru foram classificados como materiais de uso secundário devido a limitações associadas à instabilidade ou adaptabilidade restrita. Conclui-se que a análise multi-informação constitui uma metodologia integrativa robusta, capaz de eliminar a subjetividade na interpretação de múltiplos parâmetros estatísticos e viabilizar recomendações de cultivares altamente consistentes e seguras para a cadeia produtiva do feijoeiro.

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L.; interação genótipos × ambientes; melhoramento genético; recomendação

ABSTRACT

ROCHA, Gabriela Inez de Andrade, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2026. **Multi-information analysis for adaptability and phenotypic stability in bean lines.** Adviser: Leonardo Lopes Bhering.

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a staple food crop in Brazil, cultivated across a wide range of environments and management systems, which exposes genotypes to a pronounced genotype $\times$ environment (G $\times$ E) interaction. This interaction poses a major challenge in breeding programs as it hinders selection based solely on overall mean performance. To address this challenge, this study aimed to evaluate the adaptability and stability of common bean genotypes for grain yield using multi-information analysis as a pioneering, integrative strategy. Eleven genotypes (seven elite lines: CNFP16459, CNFP16416, CNFP16379, CNFP16404, CNFP16383, CNFP16380, and CNFP16384; and four commercial cultivars: BRS Esteio, BRS FP403, IPR Tuiuiú, and IPR Uirapuru) were evaluated in ten environments across Brazil during the 2018 rainy season (Anápolis - GO, Araucária - PR, Criciúma - SC, Formosa - GO, Holambra - SP, Londrina - PR, Planaltina - DF, Prudentópolis - PR, Rio Verde - GO, and Sete Lagoas - MG). Departing from traditional approaches that compare biometric methods sequentially, this study implemented multi-information analysis to perform an inverse analytical flow: first selecting the genotypes of greatest agronomic interest, and then aggregating their parameters of yield potential, invariance, plasticity, predictability, and risk into a unified performance card (meta-analysis). This framework integrated results from classical methods based on variance decomposition (Plaisted & Peterson, Wricke, and Shukla), regression models (Finlay & Wilkinson, Eberhart & Russell, Tai, and segmented regression), superiority and risk measures (Lin & Binns, Annicchiarico, and Centroids). The results revealed a highly significant and predominantly complex G $\times$ E interaction (accounting for over 90% of the significant pairs), indicating severe changes in genotype ranking across locations. Environmental stratification classified Sete Lagoas, Londrina, Criciúma, Rio Verde, and Prudentópolis as unfavorable, whereas Anápolis, Planaltina, Araucária, Holambra, and Formosa were classified as favorable. The synthesis provided by the multi-information analysis enabled highly reliable and target-oriented recommendations: the elite lines CNFP16459 and CNFP16383 showed broad adaptability and behavioral predictability, being recommended for general cultivation; the materials CNFP16384, CNFP16404, and CNFP16416, which exhibited high yield potential and positive environmental responsiveness, were recommended for favorable

environments; the commercial cultivars BRS FP403 and IPR Tuiuiú stood out for their rusticity and temporal stability, being targeted for unfavorable environments; and the genotypes CNFP16380, CNFP16379, BRS Esteio, and IPR Uirapuru were classified as secondary-use materials due to limitations associated with high instability or restricted adaptability. In conclusion, multi-information analysis represents a robust, integrative methodology that eliminates subjectivity in interpreting multiple statistical parameters, enabling highly consistent and safe cultivar recommendations for the common bean production chain.

Keywords: *Phaseolus vulgaris* L.; genotype × environment interaction; plant breeding; recommendation

RESUMO.....	4
ABSTRACT	6
1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1. Aspectos Gerais da Cultura do Feijoeiro-Comum.....	14
2.2. Melhoramento Genético do Feijoeiro-Comum no Brasil	14
2.3. Interação Genótipos × Ambientes (G×A).....	15
2.4. Métodos de Adaptabilidade e Estabilidade	16
2.4.1. Métodos Baseados em Decomposição da Variância	16
2.4.2. Métodos Baseados em Regressão Linear	17
2.4.3. Métodos Baseados em Medidas de Superioridade e Risco	18
2.5. Análise Multi-informação.....	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
3.1. Material Genético	20
3.2. Experimentos e Caracteres Avaliados	20
3.3. Análise de Variância Conjunta e Decomposição Pareada.....	22
3.4. Análises de Adaptabilidade e Estabilidade Fenotípica.....	23
3.5. Estruturação da Análise Multi-informação.....	23
3.6. Softwares Utilizados.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1. Análise de Variância Conjunta e Teste de Comparação de Médias	25
4.2. Pré-análise do comportamento de genótipos e de ambientes	26
4.3. Caracterização dos Ambientes e Índice Ambiental.....	28
4.4. Natureza e Decomposição da Interação Genótipos × Pares de Ambientes	32

4.5. Análise Multi-informação para Recomendação de Cultivares	37
4.5.1. Perfil Biométrico e Ficha de Desempenho dos Genótipos Elite	39
4.5.2. Caracterização dos Materiais Comerciais e de Uso Secundário.....	44
4.6. Síntese de Recomendação Prática	45
5. CONCLUSÕES	46
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1. INTRODUÇÃO

O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma angiosperma eudicotiledônea pertencente à família Fabaceae, sendo uma das principais leguminosas cultivadas para consumo humano e desempenhando papel fundamental na alimentação de milhões de pessoas em diversas regiões do mundo (Vasconcelos et al., 2020). Segundo estatísticas da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), os feijões secos, predominantemente pertencentes ao gênero *Phaseolus*, alcançaram produção mundial superior a 27 milhões de toneladas em cerca de 30 milhões de hectares cultivados, com países como Índia, Mianmar e Brasil entre os maiores produtores (FAO, 2025).

No Brasil, o feijão-comum, especialmente os tipos preto e carioca, juntamente com o arroz branco, constitui um dos principais componentes da dieta diária da população (Moraes e Menelau, 2017). Esse elevado consumo é sustentado pela expressiva produção nacional, que, segundo estimativas recentes da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), considerando todas as safras, situa-se em torno de 3,0 a 3,2 milhões de toneladas na temporada mais recente (CONAB, 2025). O cultivo do feijão ocorre em diversas regiões do país, envolvendo tanto a agricultura familiar quanto sistemas de produção comercial, com destaque para os estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso (CONAB, 2025). Esses números posicionam o Brasil entre os maiores produtores mundiais de feijão, sendo responsável por uma parcela expressiva da produção global. Esse cenário reforça a importância estratégica da cultura, tanto para o abastecimento interno quanto para a segurança alimentar da população.

O feijoeiro apresenta grande variabilidade morfológica em sementes, vagens e outras estruturas, sendo essa diversidade essencial para o desenvolvimento de cultivares adaptados a diferentes condições ambientais (Costa et al., 2024). No Brasil, essa cultura é cultivada em diferentes regiões geográficas e sob distintas épocas de semeadura, o que expõe a cultura à ampla diversidade de condições edafoclimáticas, incluindo variações de temperatura, precipitação, altitude e sistemas de manejo agrícola (Heinemann et al., 2025). Nesse caso, diferenças ambientais podem modificar tanto a magnitude quanto a ordem de desempenho dos genótipos avaliados (Des Marais, Hernandez & Juenger, 2013).

A resposta diferencial dos genótipos frente às variações ambientais é chamada interação genótipos $\times$ ambientes ($G \times A$) e representa um dos principais desafios para a recomendação de

cultivares, uma vez que genótipos superiores em determinado ambiente podem não manter o mesmo desempenho em condições distintas (Napier, Heckman & Juenger, 2023). Portanto, a presença de elevada interação $G \times A$ pode reduzir os ganhos de seleção e dificultar a identificação de genótipos superiores (Chabi et al., 2025). Diante disso, estudar a interação $G \times A$ é essencial para subsidiar o desenvolvimento de cultivares mais estáveis, adaptáveis e de alto rendimento (Gela et al., 2023). Além da detecção estatística e da compreensão da natureza da interação $G \times A$, seja simples ou complexa (Cruz & Castoldi, 1991), é fundamental a aplicação de métodos de adaptabilidade e estabilidade, os quais permitem caracterizar de forma mais precisa o comportamento dos genótipos frente às variações ambientais e subsidiar a recomendação de cultivares (Breda et al., 2025).

Dentre os métodos de adaptabilidade e estabilidade, destacam-se abordagens baseadas em decomposição da variância (Plaisted & Peterson, 1959; Wricke, 1962; Shukla, 1972), regressão linear (Finlay & Wilkinson, 1963; Eberhart & Russell, 1966; Tai, 1971; Cruz, Torres & Vencovsky, 1989), medidas de superioridade (Lin & Binns, 1988 e Annicchiarico, 1992; Rocha, 2022). Diante dessa variedade de metodologias, a análise multi-informação surge como uma abordagem integrativa, a qual busca sintetizar diferentes critérios em uma decisão única de recomendação (Silva Júnior et al., 2022).

Visto que no feijoeiro a interação $G \times A$ é frequentemente significativa e capaz de comprometer a seleção baseada exclusivamente na média geral dos ambientes (Chabi et al., 2025), este estudo teve como objetivo avaliar a natureza da interação $G \times A$ em linhagens de feijão-comum cultivadas na safra das águas de 2018 em diferentes cidades brasileiras, aplicar diferentes métodos de adaptabilidade e estabilidade amplamente utilizados na literatura e integrar os resultados por meio de análise multi-informação, visando à identificação e recomendação de genótipos com desempenho produtivo consistente e adequado às distintas condições ambientais avaliadas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aspectos Gerais da Cultura do Feijoeiro-Comum

O feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é reconhecido como um alimento de elevado valor nutricional, principalmente devido aos seus teores de proteínas e minerais (Pereira et al., 2018). A cultura apresenta ampla diversidade de tipos de grãos, variando quanto à cor, ao tamanho e ao padrão do tegumento. Entretanto, no Brasil, os tipos cariocas, caracterizado por tegumento bege com estrias marrons, e preto predominam na produção nacional, representando aproximadamente 70% e 20% da produção total de feijão-comum no país, respectivamente (Melo et al., 2010; Lemos et al., 2015).

No território brasileiro, o feijoeiro-comum é cultivado por grandes e pequenos produtores, em diferentes regiões, épocas de semeadura e sistemas produtivos, com variações de clima, solo, manejo e ocorrência de estresses bióticos e abióticos, configurando um cenário de elevada diversidade ambiental (Heinemann et al., 2017). Consequentemente, cultivares e linhagens de feijoeiro-comum podem expressar ampla variabilidade fenotípica em função das condições de cultivo (Breda et al. 2025). Deste modo, a obtenção de ganhos genéticos sustentáveis depende da identificação de genótipos capazes de manter desempenho consistente em ambientes contrastantes ou de apresentar adaptação específica a determinados estratos ambientais, uma vez que a ampla diversidade ambiental do país impõe desafios adicionais à estabilidade produtiva (Barili et al., 2015).

Nesse contexto, estudos em ensaios multiambientes com feijoeiro-comum demonstraram que a G×A influencia características agronômicas importantes dessa cultura, como produtividade de grãos, qualidade tecnológica e composição nutricional, reforçando a necessidade de avaliar genótipos em múltiplos locais, anos e safras para identificar materiais produtivos, adaptados e estáveis (Katuuramu et al., 2020; Carloni et al., 2022; Mutari et al., 2022). Portanto, a condução de ensaios multiambientes não representa apenas uma etapa operacional do melhoramento, mas constitui estratégia fundamental para aumentar a confiabilidade na seleção e recomendação de genótipos para ambientes diversos (Teresa, Semahegn e Bejiga, 2021).

2.2. Melhoramento Genético do Feijoeiro-Comum no Brasil

O melhoramento genético do feijoeiro-comum no Brasil tem sido conduzido desde a década de 1970, predominantemente por instituições públicas de pesquisa e ensino. Entre as principais instituições envolvidas destacam-se a Embrapa Arroz e Feijão, a Empresa de

Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (Epamig), o Instituto Agronômico de Campinas (IAC), o Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), a Universidade Federal de Lavras (UFLA) e a Universidade Federal de Viçosa (UFV) (Paula Júnior et al., 2013).

A seleção recorrente é uma das principais estratégias no melhoramento do feijoeiro-comum por permitir o acúmulo gradual de alelos favoráveis, mantendo variabilidade genética ao longo dos ciclos seletivos (Leite et al. 2016). Estudos recentes demonstraram a eficiência da seleção recorrente no aumento do potencial produtivo de famílias de feijoeiro e na obtenção de progênes com resistência a um amplo espectro de doenças (Alves et al., 2015; Lopes et al., 2019; Pádua et al., 2021; Costa et al., 2024).

Visto que a interação $G \times A$ representa uma importante fonte de variação para a produtividade de grãos no feijoeiro-comum (Torga et al., 2013; Melo et al., 2018; Melo et al., 2022), os programas de melhoramento evoluíram de um foco predominantemente voltado ao desempenho agrônomo para abordagens integradas que também consideram a interação $G \times A$ (Tsutsumi, Bulegon & Piano, 2015). Essa mudança reflete a necessidade de compreender como diferentes genótipos respondem às variações de local, ano, safra, clima e manejo, permitindo selecionar cultivares com maior estabilidade, adaptabilidade e confiabilidade produtiva em ambientes contrastantes.

2.3. Interação Genótipos $\times$ Ambientes ($G \times A$)

Do ponto de vista da genética quantitativa, a variância fenotípica pode ser decomposta em componentes genéticos, ambientais e da interação $G \times A$, sendo esta última frequentemente responsável por parcela expressiva da variação total observada em ensaios multiambientes, sobretudo para caracteres complexos como a produtividade de grãos (Napier, Heckman & Juenger, 2023). Nesse contexto, a interação $G \times A$ se manifesta quando a diferença fenotípica entre genótipos não se mantém constante entre os ambientes, de modo que o desempenho relativo passa a depender das condições ambientais específicas, evidenciando a resposta diferencial dos genótipos às variações do ambiente (Malosetti, Ribaut & van Eeuwijk, 2013).

Para detalhar o comportamento dessa variação em ensaios multiambientes, Robertson (1959) e, posteriormente, Cruz e Castoldi (1991) propuseram a decomposição da interação $G \times A$ em nível de pares de ambientes. Esse procedimento permite fracionar a interação em duas partes de naturezas distintas: fração simples em que ocorre apenas de diferenças de escala ou de magnitude de desempenho entre os genótipos, sem que ocorra alteração na ordem de

classificação dos materiais ao transitar entre as localidades, e a fração complexa caracteriza-se pela mudança efetiva no ranqueamento relativo dos genótipos entre os ambientes.

A ocorrência predominante da fração complexa impõe severas limitações ao trabalho do melhorista, pois eleva consideravelmente o risco associado à recomendação de cultivares para ambientes não testados. Contudo, a decomposição da interação $G \times A$ não fornece, por si só, informações suficientes sobre o comportamento individual dos genótipos frente às variações ambientais (Melo et al., 2007). Nesse cenário, os métodos de adaptabilidade e estabilidade possibilitam quantificar a resposta dos genótipos ao gradiente ambiental e avaliar a previsibilidade de seu desempenho, aspectos fundamentais para a recomendação de cultivares.

2.4. Métodos de Adaptabilidade e Estabilidade

A seleção e recomendação de genótipos superiores em ensaios multiambientes requer a compreensão conjunta da adaptabilidade e da estabilidade. A adaptabilidade representa a capacidade de um genótipo responder de forma favorável à melhoria das condições ambientais, enquanto a estabilidade está associada à manutenção de desempenho consistente diante das variações nos ambientes de cultivo (Cruz, Regazzi & Carneiro, 2014). A avaliação desses atributos tem sido tradicionalmente realizada por diferentes metodologias, as quais se distinguem pelos pressupostos estatísticos adotados e pela forma como interpretam a resposta dos genótipos à variação ambiental (Pereira et al., 2009).

2.4.1. Métodos Baseados em Decomposição da Variância

Os métodos propostos por Plaisted e Peterson (1959), Wricke (1962) e Shukla (1972) fundamentam-se no desdobramento estatístico da variância associada à interação $G \times A$. O objetivo comum dessas abordagens é quantificar a contribuição relativa de cada genótipo para a variância da interação, adotando o pressuposto de que materiais com menor participação individual são os mais estáveis: Plaisted & Peterson (1959): Estima a contribuição média de cada genótipo para a interação a partir de variâncias calculadas em análises pareadas de materiais genéticos, expressas pelo parâmetro θ_i . Wricke (1962): Decompõe diretamente a soma de quadrados da interação, gerando o parâmetro denominado ecovalência (W_i ou ω), em que menores valores indicam menor sensibilidade às variações ambientais. Shukla (1972): Proporciona uma abordagem estatisticamente robusta ao estimar a variância de estabilidade (σ^2_i) para cada material, permitindo a aplicação de testes de hipótese para avaliar a significância da instabilidade.

Esses métodos diferenciam-se, portanto, pelos parâmetros utilizados, mas compartilham a mesma interpretação: menores valores indicam maior estabilidade e menor sensibilidade às variações ambientais (Cruz, Regazzi & Carneiro, 2014). Embora essas metodologias sejam eficientes em isolar genótipos estáveis, elas devem ser analisadas de forma integrada com as médias de produtividade, uma vez que a estabilidade fenotípica isolada não assegura a superioridade agronômica de uma cultivar.

2.4.2. Métodos Baseados em Regressão Linear

Os métodos de regressão compartilham o princípio de utilizar modelos lineares para descrever a trajetória de resposta dos genótipos frente a um gradiente ambiental. Essas abordagens possibilitam avaliar simultaneamente parâmetros de adaptabilidade e de estabilidade/previsibilidade. Os métodos propostos por Finlay e Wilkinson (1963), Eberhart e Russell (1966), Tai (1971) e Cruz, Torres & Vencovsky (1989) têm em comum o uso de modelos de regressão linear.

O método de Finlay & Wilkinson (1963): Descreve a adaptabilidade por meio do coeficiente de regressão linear (β_i), que indica a sensibilidade do genótipo às oscilações ambientais. Materiais com $\beta_i=1$ apresentam adaptabilidade geral; materiais com $\beta_i>1$ revelam alta sensibilidade e são indicados para ambientes favoráveis; e materiais com $\beta_i<1$ exibem menor sensibilidade, sendo adaptados a condições desfavoráveis (Cruz, Regazzi & Carneiro, 2014).

O método de Eberhart & Russell (1966): Avança conceitualmente em relação ao modelo anterior ao incorporar a variância dos desvios de regressão (S^2_{di}) como a medida de estabilidade. Genótipos estáveis e altamente previsíveis são aqueles que apresentam desvios estatisticamente nulos ($S^2_{di}\approx 0$), enquanto a adaptabilidade permanece avaliada pelo coeficiente β_i (Cruz, Regazzi & Carneiro, 2014).

O método de Tai (1971): Propõe a decomposição da interação em dois componentes independentes, expressos pelos parâmetros α_i (associado à resposta linear do genótipo, interpretado de forma análoga ao β_i) e λ_i (representando a variância dos desvios, utilizada como medida de previsibilidade) (Cruz, Regazzi & Carneiro, 2014).

O método de regressão Bissegmentada (Cruz, Torres & Vencovsky, 1989): Consiste em um modelo refinado que avalia separadamente a resposta dos materiais em ambientes desfavoráveis (β_{1i}) e favoráveis (β_{2i}). Sob essa metodologia, o perfil ideal de adaptabilidade é definido por genótipos que apresentam menor sensibilidade nos ambientes restritivos ($\beta_{1i}<1$) e

alta capacidade de resposta às melhorias em ambientes favoráveis ($\beta_2i > 1$), associados a desvios de regressão controlados (Cruz, Regazzi & Carneiro, 2014).

2.4.3. Métodos Baseados em Medidas de Superioridade e Risco

Esse grupo metodológico prioriza o desempenho produtivo dos genótipos em relação aos extremos de resposta ou à média geral observada na rede experimental. Os detalhes destes métodos podem ser verificados em (Cruz, Regazzi & Carneiro, 2014).

O método de Lin & Binns (1988): Baseia-se no estimador de superioridade genotípica (P_i), que quantifica a distância quadrática entre o rendimento de um genótipo e o rendimento máximo observado em cada local. Genótipos que apresentam os menores valores de P_i são classificados como superiores, pois conseguem se manter consistentes e próximos do teto produtivo de cada ambiente de cultivo.

O método de Annicchiarico (1992): Estima um índice de confiança (W_i) que expressa a probabilidade de um genótipo apresentar um desempenho relativo superior à média ambiental sob um determinado nível de significância estatística, permitindo uma interpretação direta do risco de adoção do material pelo produtor.

O método dos centroides (Rocha, 2022): Consiste em uma classificação espacial multivariada na qual a posição de cada genótipo é comparada, via distâncias euclidianas, a quatro ou sete "ideótipos" pré-estabelecidos com base nos dados experimentais. Esses ideótipos representam padrões teóricos extremos ou intermediários de resposta (C1: máxima produtividade geral; C2: máxima específica para favoráveis; C3: máxima específica para desfavoráveis; C4: mínima produtividade geral, dentre outros). Essa metodologia viabiliza o enquadramento direto dos genótipos em classes de adaptabilidade bem definidas (Classes I a VII), facilitando a tomada de decisão.

2.5. Análise Multi-informação

A presença de uma ampla variedade de métodos biométricos na literatura representa uma vantagem analítica, contudo, gera um desafio prático evidente: a escolha da metodologia influencia diretamente o ranqueamento dos genótipos, frequentemente culminando em recomendações distintas ou contraditórias para um mesmo conjunto de dados experimentais. Esse conflito decorre dos diferentes pressupostos estatísticos e parâmetros interpretativos de cada modelo, introduzindo subjetividade no processo decisório do melhorista. Uma vez que muitos desses métodos são conceitualmente complementares, surgiu a necessidade de

desenvolver estratégias integrativas capazes de unificar múltiplos critérios em um procedimento analítico unificado.

Nesse contexto, estabelece-se a análise multi-informação. Essa abordagem baseia-se na consolidação estratégica de parâmetros extraídos de diferentes famílias metodológicas em uma única estrutura interpretativa de decisão, permitindo que o pesquisador visualize simultaneamente o potencial produtivo, a estabilidade e a adaptabilidade conforme mencionado por Silva Júnior et al., 2022. Nos estudos de multi-informação adota-se um procedimento inverso ao que se normalmente pratica em estudos de estabilidade e adaptabilidade. Em vez de adotar uma única metodologia para depois descrever o comportamento de cada genótipo, a multi-informação considera, inicialmente, os genótipos de interesse (identificados pelo seu bom desempenho ou pelas informações adicionais de uso e cultivo já estabelecido) e agrega, por estratégia de meta-análise, as informações sobre os valores positivos e negativos apontados por todo o grupo de métodos clássicos de estudo da interação $G \times A$. Assim, torna-se mais fácil recomendar um determinado genótipo pelo somatório de seus valores positivos sem perder de vista suas deficiências.

No arroz, a análise multi-informação consolidou parâmetros de adaptabilidade e o método do centroide para identificar linhagens superiores em diferentes ambientes (Silva Júnior et al., 2022), enquanto na alfafa foi adaptada para lidar com dados de medidas repetidas no tempo, visando equilibrar a produtividade de matéria seca com a persistência do estande de plantas ao longo de sucessivos cortes (Oliveira et al., 2023). Em ambos os casos, a técnica permitiu transformar dados complexos em classificações claras, como as categorias de adaptabilidade geral ou específica, facilitando a identificação de genótipos promissores como o BRA 02691 (Silva Júnior et al., 2022) e o PSB 4 (Oliveira et al., 2023).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Material Genético

Foram avaliados 11 genótipos de feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), compreendendo sete linhagens elite experimentais desenvolvidas pela Embrapa Arroz e Feijão, e quatro cultivares comerciais amplamente utilizadas como testemunhas, obtidas junto à Embrapa e ao Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR). O germoplasma avaliado incluiu representantes dos grupos comerciais carioca e preto. A codificação, a identificação e a caracterização detalhada do material genético utilizado encontram-se descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Genótipos de feijoeiro-comum avaliados nos ensaios multiambientais na safra das águas de 2018.

Código	Genótipo	Tipo	Grupo Comercial	Instituição/Origem
G1	CNFP16459	Linhagem	Carioca	Embrapa
G2	CNFP16416	Linhagem	Carioca	Embrapa
G3	CNFP16379	Linhagem	Carioca	Embrapa
G4	CNFP16404	Linhagem	Carioca	Embrapa
G5	CNFP16383	Linhagem	Carioca	Embrapa
G6	CNFP16380	Linhagem	Carioca	Embrapa
G7	CNFP16384	Linhagem	Carioca	Embrapa
G8	BRS Esteio	Cultivar	Carioca	Embrapa
G9	BRS FP403	Cultivar	Preto	Embrapa
G10	IPR Tuiuiú	Cultivar	Carioca	IAPAR
G11	IPR Uirapuru	Cultivar	Preto	IAPAR

A inclusão de linhagens experimentais e cultivares comerciais amplamente utilizadas em sistemas produtivos teve como objetivo ampliar a base comparativa do estudo, permitindo avaliar o comportamento diferencial dos genótipos frente à variabilidade ambiental presente nos ensaios multiambientais.

3.2. Experimentos e Caracteres Avaliados

Os experimentos de campo foram conduzidos durante a safra das águas de 2018 em dez ambientes contrastantes distribuídos em diferentes regiões do território brasileiro, cobrindo os estados de Goiás, Paraná, Santa Catarina, São Paulo, Minas Gerais e o Distrito Federal. A rede

experimental foi constituída pelos municípios de Anápolis (GO - A1), Araucária (PR - A2), Criciúma (SC - A3), Formosa (GO - A4), Holambra (SP - A5), Londrina (PR - A6), Planaltina (DF - A7), Prudentópolis (PR - A8), Rio Verde (GO - A9) e Sete Lagoas (MG - A10) (Figura 1).



Figura 1. Ambientes experimentais utilizados na avaliação de genótipos de feijoeiro na safra das águas de 2018.

Em cada ambiente, o delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados (DBC), com três repetições. Cada repetição foi composta por parcelas correspondentes aos genótipos avaliados, sendo a distribuição das parcelas realizada de forma aleatória dentro de cada bloco. As parcelas foram constituídas por três linhas de 3,0 metros de comprimento, espaçadas em 0,50 m, com densidade de semeadura ajustada para 12 sementes por metro linear, totalizando uma densidade populacional média adequada para a cultura. A adoção do DBC visou reduzir a influência da variação edáfica local e maximizar a precisão experimental dentro de cada ambiente. O caráter agrônômico avaliado foi a produtividade de grãos, expressa em kg

ha⁻¹, obtida a partir da colheita e pesagem das plantas das parcelas úteis, corrigida para a umidade padrão de comercialização de 13%. A produtividade de grãos representa o principal critério de seleção em programas de melhoramento do feijoeiro e constitui um caráter quantitativo altamente influenciado por fatores genéticos e ambientais.

3.3. Análise de Variância Conjunta e Decomposição Pareada

Previamente às análises conjuntas, os pressupostos de normalidade dos resíduos e homogeneidade de variâncias foram verificados e validados estatisticamente. A análise de variância conjunta (ANOVA) para produtividade de grãos seguiu o modelo estatístico aditivo:

$$Y_{ijk} = u + G_i + A_j + (GA)_{ij} + B/A_{jk} + E_{ijk}$$

em que: Y_{ijk} corresponde à produtividade de grãos do i -ésimo genótipo no j -ésimo ambiente e no k -ésimo bloco; u representa a média geral do experimento; G_i é o efeito fixo do i -ésimo genótipo; A_j é o efeito aleatório do j -ésimo ambiente; $(GA)_{ij}$ é o efeito da interação entre o i -ésimo genótipo e o j -ésimo ambiente; B/A_{jk} corresponde ao efeito aleatório do k -ésimo bloco hierarquizado dentro do j -ésimo ambiente; e E_{ijk} representa o erro experimental aleatório associado à observação.

A partir do quadrado médio da ANOVA conjunta, estimaram-se os principais componentes de variabilidade genotípica, a variância da interação $G \times A$, o coeficiente de variação experimental (CV%) e o coeficiente de determinação genotípica, que expressa a herdabilidade em sentido amplo com base na média dos ambientes para genótipos de efeito fixo. As comparações múltiplas de médias entre genótipos e ambientes foram realizadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$).

A fim de detalhar a dinâmica da interação $G \times A$, realizou-se a decomposição do quadrado médio da interação em causas de variação atribuídas às interações pareadas de ambientes, totalizando 45 análises de variância pareadas. A variabilidade associada à interação entre genótipos e pares de ambientes foi particionada em sua fração simples e complexa utilizando os estimadores %C1 e %C2, propostos por Robertson (1959) e Cruz e Castoldi (1991), respectivamente: O estimador %C1 (Robertson, 1959) fundamenta-se nas variâncias genotípicas em cada ambiente e no coeficiente de correlação genética entre eles. O estimador %C2 (Cruz & Castoldi, 1991) quantifica a fração complexa a partir do desvio de ordenamento relativo dos genótipos e da diferença de escala entre os locais experimentais.

3.4. Análises de Adaptabilidade e Estabilidade Fenotípica

Para caracterizar o comportamento do germoplasma frente às oscilações ambientais, foram empregados dez métodos biométricos clássicos, categorizados de acordo com suas bases estatísticas e conceituais (Tabela 2).

Tabela 2. Métodos biométricos utilizados na análise de adaptabilidade e estabilidade fenotípica.

Base de Análise	Método	Referência
Decomposição de Variância	Ecovalência	Wricke (1962)
Decomposição de Variância	Variância de estabilidade	Shukla (1972)
Decomposição de Variância	Plaisted & Peterson	Plaisted & Peterson (1959)
Regressão Linear	Finlay & Wilkinson	Finlay & Wilkinson (1963)
Regressão Linear	Eberhart & Russell	Eberhart & Russell (1966)
Regressão Linear	Tai	Tai (1971)
Regressão Linear	Regressão bissegmentada	Cruz, Torres & Vencovsky (1989)
Medidas de Superioridade	Lin & Binns	Lin & Binns (1988)
Medidas de Superioridade	Annicchiarico	Annicchiarico (1992)
Medidas de Superioridade	Método dos Centroides	Rocha (2022)

3.5. Estruturação da Análise Multi-informação

A síntese integrativa dos resultados foi conduzida por meio da análise multi-informação citada por Silva Júnior et al., 2022. Esta abordagem visa converter a complexidade dos resultados individuais em uma decisão única e biologicamente consistente, estruturando-se em três etapas operacionais: Etapa 1 - Eleição dos Materiais de Interesse: Selecionaram-se, a priori, as linhagens que apresentaram os maiores potenciais produtivos ou relevância de seleção fenotípica na rede experimental (neste estudo, as quatro linhagens elite superiores G7, G4, G2 e G1). Etapa 2 - Consolidação dos Perfis Biométricos (Meta-análise): Para cada genótipo eleito, agregou-se um amplo conjunto de descritores biométricos extraídos de todas as metodologias clássicas aplicadas. O perfil de desempenho reuniu estimativas de: potencial produtivo médio geral e em mega-ambientes (favorável e desfavorável); plasticidade temporal; previsibilidade e estabilidade relativa; sensibilidade aos ambientes favoráveis e desfavoráveis; e posicionamento espacial em relação aos ideótipos de referência. Etapa 3 - Recomendação Prática de Cultivares: Estruturou-se a recomendação final a partir da ponderação das qualidades e deficiências individuais acumuladas na ficha de desempenho de cada genótipo.

3.6. Softwares Utilizados

A organização, conferência e estruturação inicial dos dados experimentais foram conduzidas em planilhas eletrônicas no Microsoft Excel®, possibilitando a padronização do banco de dados. As análises estatísticas e biométricas foram executadas pelo software GENES (Cruz, 2013) e Rbio (Bhering, 2017).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise de Variância Conjunta e Teste de Comparação de Médias

A validação do modelo estatístico indicou que os resíduos da análise de variância conjunta atenderam plenamente aos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias, atestados pela não significância estatística ($p > 0,05$) dos testes de verificação prévia. A decomposição do quadrado médio da ANOVA conjunta evidenciou efeito altamente significativo ($p < 0,01$) para os ambientes e para a interação genótipos por ambientes ($G \times A$), ao passo que o efeito principal de genótipos não apresentou significância estatística pelo teste F ($F = 1,90_{ns}$) (Tabela 3). A significância da interação $G \times A$ pode ser usada para explicar a falta de significância para a fonte de variação de genótipos. A acentuada variação associada ao efeito ambiental ratifica a discrepância edafoclimática entre os dez locais de avaliação na safra das águas de 2018, confirmando que a heterogeneidade ambiental exerceu forte influência sobre a expressão fenotípica do rendimento de grãos. Embora os genótipos não tenham apresentado diferenças expressivas quando comparados unicamente pelo seu desempenho médio geral ($2644,69 \text{ kg ha}^{-1}$), a significância da interação $G \times A$ demonstra a ocorrência de respostas diferenciais marcantes do germoplasma ao longo do gradiente ambiental (Tabela 3).

Tabela 3. Análise de variância conjunta para produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de 11 genótipos de feijoeiro-comum avaliados em dez ambientes na safra das águas de 2018.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio (QM)	F
Blocos/Ambientes	20	348.698,46	
Genótipos (G)	10	546.791,50 ^{ns}	1,90
Ambientes (A)	9	23.921.996,30**	68,61
Interação $G \times A$	90	288.275,95**	2,10
Resíduo	200	137.161,10	

ns: não significativo; ** significativo a 1% pelo teste F.

A magnitude da variação ambiental e da sensibilidade genotípica é respaldada pelas estimativas dos parâmetros genéticos e experimentais (Tabela 4). A variância associada à interação $G \times A$ ($\sigma_{ga}^2 = 45792,38$) superou em mais de cinco vezes o componente quadrático genotípico ($\sigma_g^2 = 8617,18$), revelando a severidade das alterações no comportamento relativo dos materiais genéticos de um local para outro. Essa expressiva variação atribuída à interação é um padrão frequentemente reportado na literatura para a cultura do feijoeiro-comum em ensaios multiambientais, refletindo a elevada sensibilidade fisiológica da espécie às oscilações

de temperatura, precipitação e atributos edáficos (Pereira et al., 2013; Barili et al., 2015; Melo et al., 2018).

Tabela 4. Estimativas de parâmetros genéticos e experimentais obtidos na ANOVA conjunta.

Parâmetros experimentais	Estimativa / Valor
Componente quadrático genotípico (φ_g)	8617,18
Variância da interação G×A (σ_{ga}^2)	45792,38
Coefficiente de determinação genotípico ($h^2\%$)	47,27
Coefficiente de variação genético ($CV_g \%$)	3,51
Média geral do ensaio ($kg\ ha^{-1}$)	2.644,69
Coefficiente de variação experimental ($CV_e \%$)	14,00

O coeficiente de determinação genotípico ($h^2 = 47,27\%$), que é o termo a ser usado em vez de herdabilidade no sentido amplo quando os genótipos são considerados de efeito fixo, apresentou magnitude moderada, indicando que a expressão da produtividade de grãos foi governada de forma equilibrada por efeitos genéticos, componentes ambientais e pela interação G×A (Tabela 4). Associado a um coeficiente de variação genético reduzido ($CV_g = 3,51\%$) e a um coeficiente de variação experimental adequado para ensaios de campo ($CV_e = 14,00\%$), esse valor sugere que a seleção direta baseada exclusivamente no desempenho fenotípico médio geral apresenta eficácia limitada. Resultados análogos foram obtidos por Santos et al. (2023) ao avaliarem linhagens de feijoeiro sob múltiplos cenários de cultivo, observando determinação genotípica intermediária para produtividade de grãos (próxima a 40%) e atribuindo esse comportamento ao expressivo controle ambiental sobre o caráter. Conforme salientado por Silva (2010), a presença marcante da interação G×A compromete a estabilidade do ranqueamento dos genótipos entre as regiões avaliadas, tornando indispensável a aplicação de métodos biométricos detalhados para suportar recomendações de maior previsibilidade agrícola.

4.2. Pré-análise do comportamento de genótipos e de ambientes

A análise prévia do comportamento produtivo do germoplasma e das características dos ambientes de teste constitui uma etapa fundamental para compreender a dinâmica da interação genótipos × ambientes (G×A) e estruturar a subsequente análise de multi-informação.

A produtividade média dos genótipos variou dentro de um intervalo relativamente estreito, estendendo-se de 2.426,47 $kg\ ha^{-1}$ na cultivar BRS FP403 a 2.857,87 $kg\ ha^{-1}$ na

linhagem CNFP16384 (Figura 2A e Tabela 5). Essa reduzida amplitude produtiva entre as médias gerais dos genótipos (apenas 431,40 kg ha⁻¹) contrasta drasticamente com a expressiva variação observada entre as médias dos ambientes, que oscilou de 3.747,00 kg ha⁻¹ em Formosa (A4) a 1.146,94 kg ha⁻¹ em Sete Lagoas (A10) (Figura 2B e Tabela 5). Esse cenário evidencia de forma contundente que as oscilações edafoclimáticas exercem um controle muito mais expressivo sobre o rendimento de grãos do que as diferenças genéticas isoladas. Esse comportamento é frequentemente observado em ensaios multiambientais de feijoeiro-comum, nos quais o rendimento é fortemente condicionado pelas flutuações do ambiente físico, conforme corroborado por estudos como os de Chimenez-Franzon et al. (2022) e Barili et al. (2015).

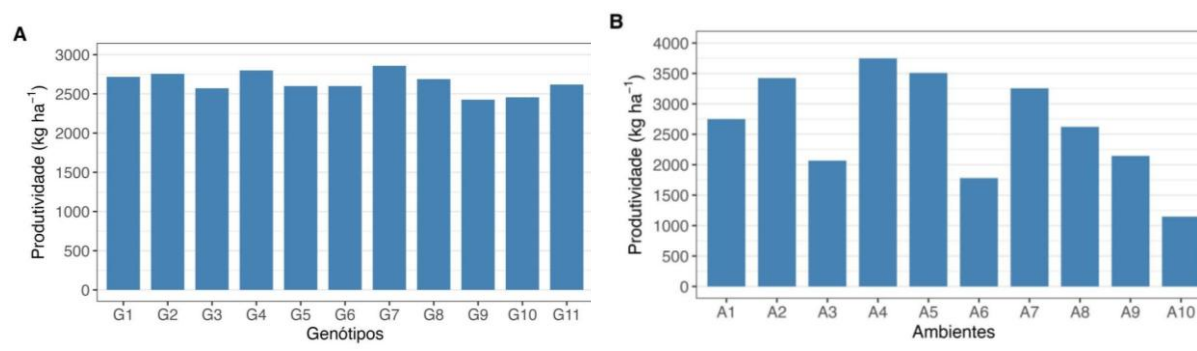


Figura 2. Média geral da produtividade de grãos (kg ha⁻¹). (A) Genótipos considerando todos os ambientes. G1: CNFP16459; G2: CNFP16416; G3: CNFP16379; G4: CNFP16404; G5: CNFP16383; G6: CNFP16380; G7: CNFP16384; G8: BRS Esteio; G9: BRS FP403; G10: IPR Tuiuiú; G11: IPR Uirapurú. (B) Ambientes considerando todos os genótipos. A1: Anápolis; A2: Araucária; A3: Criciúma; A4: Formosa; A5: Holambra; A6: Londrina; A7: Planaltina; A8: Prudentópolis; A9: Rio Verde; A10: Sete Lagoas.

O desdobramento dessas médias pelo teste de Tukey (Tabela 5) revela aspectos cruciais sobre a capacidade discriminatória dos locais experimentais. Os ambientes de Formosa (A4), Holambra (A5), Araucária (A2) e Planaltina (A7) estabeleceram-se de maneira consistente nos grupos de maior produtividade média, enquanto Sete Lagoas (A10) esteve no extremo inferior do gradiente tecnológico. No entanto, diferenças estatisticamente significativas ($p \leq 0,05$) entre os genótipos foram detectadas exclusivamente nos ambientes de Araucária (A2), Criciúma (A3), Holambra (A5) e Planaltina (A7). Nos demais seis locais (Anápolis, Formosa, Londrina, Prudentópolis, Rio Verde e Sete Lagoas), todos os materiais compartilharam a mesma classificação de médias pelo teste de Tukey. Esse comportamento evidencia que o poder discriminatório dos ambientes é altamente variável. Ambientes que propiciam maior contraste e favorabilidade (como Araucária, Holambra e Planaltina) mostram-se ideais para a expressão

da variabilidade genética e para a identificação de materiais superiores, justificando a relevância de avaliações multiambientais para evitar conclusões errôneas pautadas apenas em médias gerais.

Tabela 5. Médias de produtividade (kg ha⁻¹) de 11 genótipos de feijoeiro comum (G) avaliados em 10 diferentes ambientes (A) na safra das águas de 2018. G1: CNFP16459; G2: CNFP16416; G3: CNFP16379; G4: CNFP16404; G5: CNFP16383; G6: CNFP16380; G7: CNFP16384; G8: BRS Esteio; G9: BRS FP403; G10: IPR Tuiuiú; G11: IPR Uirapurú. A1: Anápolis; A2: Araucária; A3: Criciúma; A4: Formosa; A5: Holambra; A6: Londrina; A7: Planaltina; A8: Prudentópolis; A9: Rio Verde; A10: Sete Lagoas.

Gen	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
G1	2740 ABa	3687 Aabc	1901 BCabc	3643 Aa	3684 Aab	2011 BCa	3516 Aab	2242 BCa	2404 Ba	1341 Ca
G2	3250 Aa	3373 Abcd	2121 Babc	3750 Aa	3900 Aa	2063 BCa	3497 Aab	2288 Ba	2174 Ba	1146 Ca
G3	2514 Ca	3035 ABCbcd	2276 CDabc	3657 ABa	3972 Aa	1360 DEa	2807 BCb	2839 BCa	2206 CDa	1041 Ea
G4	2901 CDa	3462 ABCbcd	2508 CDab	3994 ABa	4042 Aa	1522 EFa	3088 ABCDb	3064 BCDa	2397 DE a	1018 Fa
G5	3112 Aa	3453 Abcd	1766 Bbc	3575 Aa	3309 Aab	1865 Ba	3103 Ab	2900 Aa	1907 Ba	1010 Ba
G6	2909 BCa	3410 ABbcd	1675 DEbc	4331 Aa	3180 BCab	1586 DEa	3174 BCab	2260 CDa	2325 CDa	1140 Ea
G7	3097 BCDa	3984 ABab	2167 DEabc	3578 ABCa	3548 ABCab	1870 Ea	4102 Aa	2833 CDa	2172 DEa	1225 Ea
G8	2369 CDa	2700 BCDd	2806 BCa	4034 Aa	3466 ABab	1827 DEa	3499 ABab	2858 BCa	2041 CDEa	1274 Ea
G9	2526 BCDEa	2839 ABCDcd	2032 DEabc	3546 Aa	3357 ABab	1742 EFa	3055 ABCb	2204 CDEa	1933 DEFa	1028 Fa
G10	2356 BCDEa	3242 ABbcd	1522 EFc	3457 Aa	3401 Aab	1682 DEFa	2918 ABCb	2594 ABCDa	2202 CDEa	1190 Fa
G11	2480 CDa	4459 Aa	1951 DEabc	3647 Aa	2729 BCDb	2064 DEa	3059 BCb	2750 BCDa	1840 DEa	1200 Ea

Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas na linha (comparação entre ambientes) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na coluna (comparação entre genótipos) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Nesta análise inicial, destacaram-se pelo elevado teto produtivo geral as linhagens CNFP16384 (G7), que registrou a expressiva marca de 4.102,00 kg ha⁻¹ em Planaltina (A7), CNFP16404 (G4), CNFP16416 (G2) e CNFP16459 (G1). Em contrapartida, as cultivares comerciais BRS FP403 (G9) e IPR Tuiuiú (G10) tenderam a apresentar menores médias na maioria dos ambientes avaliados, evidenciando as limitações do melhoramento clássico quando não há direcionamento específico para ambientes de alto rendimento.

4.3. Caracterização dos Ambientes e Índice Ambiental

A estratificação ambiental fundamentada no gradiente de favorabilidade edafoclimática permite refinar a recomendação de cultivares, identificando materiais responsivos ou tolerantes à restrição ambiental (Figura 3, Tabelas 6 e 7), isso porque fornece suporte para a interpretação dos métodos de adaptabilidade e estabilidade aplicados posteriormente, uma vez que a

identificação de ambientes contrastantes permite compreender de forma mais precisa a resposta diferencial dos genótipos frente às variações ambientais.

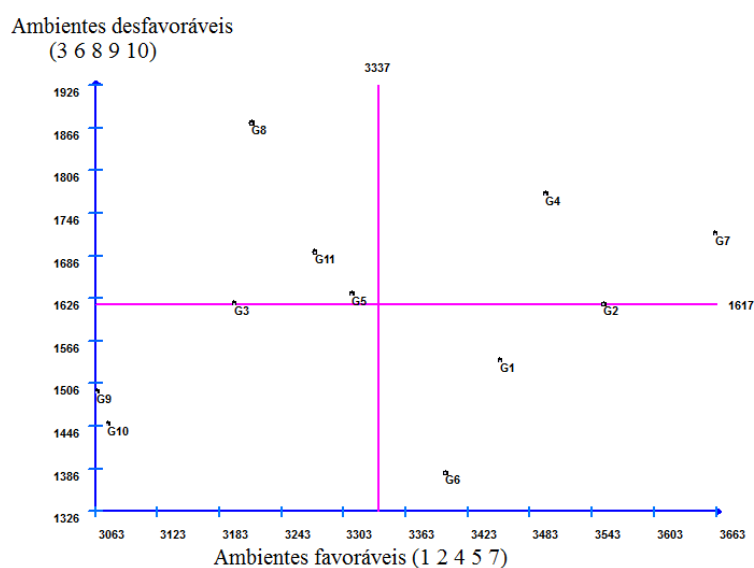


Figura 3. Desempenho médio dos genótipos em relação aos ambientes favoráveis e desfavoráveis.

Nos ambientes favoráveis (Tabela 6), as linhagens elite apresentaram superioridade incontestável. O topo do ranking foi ocupado por CNFP16384 (G7; 3.662,2 kg ha⁻¹), seguido por CNFP16416 (G2; 3.554,4 kg ha⁻¹), CNFP16404 (G4; 3.498,0 kg ha⁻¹) e CNFP16459 (G1; 3.454,2 kg ha⁻¹), todos classificados como superiores. Esse comportamento expressa uma elevada plasticidade fenotípica positiva e capacidade de resposta a melhorias de manejo e insumos tecnológicos. Em contrapartida, as cultivares comerciais IPR Tuiuiú (G10; 3.075,3 kg ha⁻¹) e BRS FP403 (G9; 3.064,9 kg ha⁻¹) ficaram restritas ao grupo de classificação inferior nessas condições ótimas, comprovando que materiais de menor potencial produtivo geral falham em responder plenamente ao ganho ambiental.

Tabela 6. Desempenho médio dos genótipos e classificação em mega-ambientes favoráveis (Anápolis, Planaltina, Araucária, Holambra e Formosa).

Genótipo	Média (kg ha ⁻¹)	Classificação de Desempenho
G7 (CNFP16384)	3662,2	Superior
G2 (CNFP16416)	3554,4	Superior
G4 (CNFP16404)	3498,0	Superior
G1 (CNFP16459)	3454,2	Superior
G6 (CNFP16380)	3401,2	Intermediário
G5 (CNFP16383)	3310,9	Intermediário
G11 (IPR Uirapuru)	3275,2	Intermediário

G8 (BRS Esteio)	3214,1	Intermediário
G3 (CNFP16379)	3197,1	Inferior
G10 (IPR Tuiuiú)	3075,3	Inferior
G9 (BRS FP403)	3064,9	Inferior

Nos ambientes desfavoráveis (Tabela 7), o ranqueamento sofreu uma alteração expressiva (efeito crossover), típica da natureza complexa da interação $G \times A$. Nessa condição restritiva, a cultivar comercial carioca BRS Esteio (G8) assumiu a liderança com uma média de 2.161,5 kg ha⁻¹ (Superior), demonstrando elevada rusticidade e estabilidade produtiva sob condições limitantes. Contudo, as linhagens CNFP16404 (G4; 2.102,0 kg ha⁻¹) e CNFP16384 (G7; 2.053,5 kg ha⁻¹) também se mantiveram no grupo superior, o que as caracteriza como materiais de ampla adaptabilidade, pois conseguem conciliar um alto teto nos locais favoráveis com tolerância aos estresses edafoclimáticos dos locais restritivos. No extremo inferior, as cultivares IPR Tuiuiú (G10; 1.838,3 kg ha⁻¹) e BRS FP403 (G9; 1.788,1 kg ha⁻¹) voltaram a apresentar baixos rendimentos (Tabela 7), indicando que a estabilidade que eventualmente apresentam não é acompanhada de produtividade satisfatória.

Tabela 7. Desempenho médio dos genótipos e classificação em mega-ambientes desfavoráveis (Sete Lagoas, Londrina, Criciúma, Rio Verde e Prudentópolis).

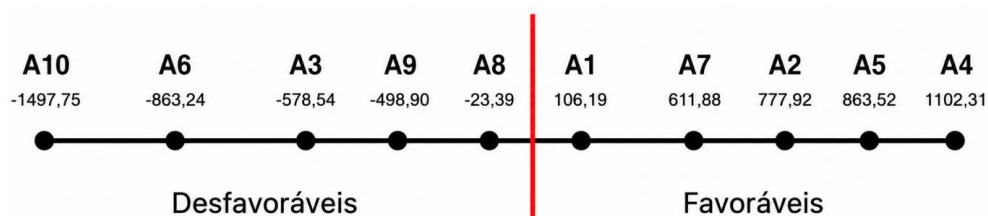
Genótipo	Média (kg ha ⁻¹)	Classificação de Desempenho
G8 (BRS Esteio)	2161,5	Superior
G4 (CNFP16404)	2102,0	Superior
G7 (CNFP16384)	2053,5	Superior
G1 (CNFP16459)	1980,2	Intermediário
G11 (IPR Uirapuru)	1961,1	Intermediário
G2 (CNFP16416)	1958,7	Intermediário
G3 (CNFP16379)	1944,9	Intermediário
G5 (CNFP16383)	1889,8	Inferior
G10 (IPR Tuiuiú)	1838,3	Inferior
G6 (CNFP16380)	1797,5	Inferior
G9 (BRS FP403)	1788,1	Inferior

Essas oscilações e comportamentos diferenciais dão sustentação biológica e estatística à necessidade de aplicação da análise de multi-informação. Ao avaliar o comportamento dos genótipos de maneira integrada, agregando produtividade média geral, desempenho em mega-ambientes favoráveis e desfavoráveis, estabilidade e adaptabilidade, o melhorista dispõe de uma

ficha de desempenho completa, mitigando os riscos de recomendações amplas pautadas em critérios isolados e estáticos.

A caracterização dos ambientes por meio dos índices ambientais possibilitou avaliar a magnitude da variação ambiental e classificar os locais experimentais de acordo com sua favorabilidade (Figura 4 e Tabela 8). Os ambientes Sete Lagoas (A10), Londrina (A6), Criciúma (A3), Rio Verde (A9) e Prudentópolis (A8) apresentaram índices ambientais negativos, sendo categorizados como desfavoráveis (D), caracterizando locais menos adequados ao pleno desenvolvimento das plantas e resultando em menores médias produtivas dos genótipos. Em contrapartida, Anápolis (A1), Planaltina (A7), Araucária (A2), Holambra (A5) e Formosa (A4) exibiram índices positivos, sendo considerados ambientes favoráveis (F), nos quais ocorreu maior expressão do potencial produtivo dos materiais avaliados.

Figura 4. Representação esquemática dos ambientes ordenados em função de seus índices ambientais, evidenciando a posição relativa de cada ambiente ao longo de um gradiente de condições desfavoráveis a favoráveis.



Legenda: A linha vertical indica a transição entre condições ambientais contrastantes. A1: Anápolis; A2: Araucária; A3: Criciúma; A4: Formosa; A5: Holambra; A6: Londrina; A7: Planaltina; A8: Prudentópolis; A9: Rio Verde; A10: Sete Lagoas.

Tabela 8. Médias produtivas gerais e classificação ambiental em favorável (F) e desfavorável (D) com base no Índice Ambiental ($\mu = 2.644,69 \text{ kg ha}^{-1}$).

Ambiente / Local	Média (kg ha ⁻¹)	Índice Ambiental	Classificação
1. Anápolis - GO	2750,88	106,19	Favorável (F)
2. Araucária - PR	3422,61	777,92	Favorável (F)
3. Criciúma - SC	2066,15	-578,54	Desfavorável (D)
4. Formosa - GO	3747,00	1102,31	Favorável (F)
5. Holambra - SP	3508,21	863,52	Favorável (F)
6. Londrina - PR	1781,46	-863,24	Desfavorável (D)
7. Planaltina - DF	3256,58	611,88	Favorável (F)
8. Prudentópolis - PR	2621,30	-23,39	Desfavorável (D)

9. Rio Verde - GO	2145,79	-498,90	Desfavorável (D)
10. Sete Lagoas - MG	1146,94	-1497,75	Desfavorável (D)
Média Geral	2644,69		

Resultados semelhantes têm sido observados em estudos recentes conduzidos com feijoeiro em múltiplos ambientes. Nascimento (2022), avaliando genótipos de feijão-preto em diferentes condições ambientais, verificou que a estratificação dos ambientes favoráveis e desfavoráveis permitiu identificar materiais com adaptação específica e maior previsibilidade produtiva. De forma semelhante, estudo desenvolvido na UTFPR demonstrou que a classificação ambiental contribui para a identificação de cultivares mais responsivas em ambientes de maior favorabilidade e de genótipos mais estáveis sob condições restritivas, aumentando a eficiência da recomendação de cultivares de feijoeiro-comum (Baldin et al., 2021). Essa diferenciação evidencia a elevada heterogeneidade ambiental entre os locais avaliados e reforça a importância da utilização de ambientes contrastantes em estudos de adaptabilidade e estabilidade. Segundo Rocha (2022), genótipos mais responsivos às melhorias ambientais tendem a apresentar adaptação específica a ambientes favoráveis, enquanto materiais menos responsivos podem apresentar desempenho relativamente superior em condições desfavoráveis.

4.4. Natureza e Decomposição da Interação Genótipos × Pares de Ambientes

A análise de variância conjunta fornece um indicativo geral sobre a significância da interação genótipos × ambientes ($G \times A$), contudo, não detalha as variações comportamentais específicas dos genótipos ao longo de locais determinados. Diante disso, a decomposição da interação $G \times A$ em nível de pares de ambientes (Tabelas 9 e 10) torna-se um procedimento indispensável para particularizar as causas dessa variação, identificando em quais cenários as respostas diferenciais são de fato relevantes.

Tabela 9. Decomposição do quadrado médio da interação genótipos x pares de ambientes (QM), sua parte complexa (%C1 segundo Robertson, 1959 e %C2 segundo Cruz e Castoldi, 1991), correlação fenotípica entre pares de ambientes e classificação dos pares de ambientes em favorável (F) e desfavorável (D) em ensaios de avaliação da produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de 11 genótipos de feijoeiro-comum avaliados em dez ambientes na safra das águas de 2018.

FV	GL ¹	QM	%C1	%C2	r	Amb		
GxA 1x2	10	389522.6**	87.49	73.56	0.2931	F	e	F

GxA 1x3	10	396916.5**	99.03	103.84	-0.0995	F	e	D
GxA 1x4	10	225790.2 ^{ns}	97.85	91.26	0.1301	F	e	F
GxA 1x5	10	268817.1*	97.75	82.39	0.2895	F	e	F
GxA 1x6	10	177848 ^{ns}	92.85	80.42	0.2497	F	e	D
GxA 1x7	10	188461.7 ^{ns}	98.23	71.03	0.4771	F	e	F
GxA 1x8	10	319583.9*	99.99	102.47	-0.0504	F	e	D
GxA 1x9	10	170707 ^{ns}	85.94	76.12	0.2154	F	e	D
GxA 1x10	10	195223.5 ^{ns}	66.53	73.00	-0.2043	F	e	D
GxA 2x3	10	761754.3**	96.69	111.07	-0.3193	F	e	D
GxA 2x4	10	550596.5**	84.69	91.82	-0.1756	F	e	F
GxA 2x5	10	832378**	97.55	115.67	-0.4058	F	e	F
GxA 2x6	10	288305*	61.42	44.09	0.4848	F	e	D
GxA 2x7	10	431197.5**	93.83	80.27	0.2682	F	e	F
GxA 2x8	10	468851.1**	89.06	83.50	0.1211	F	e	D
GxA 2x9	10	453847.3**	68.91	71.32	-0.0711	F	e	D
GxA 2x10	10	349765.5**	35.13	30.00	0.2704	F	e	D
GxA 3x4	10	220755.6 ^{ns}	92.14	76.62	0.3084	D	e	F
GxA 3x5	10	236330.2 ^{ns}	99.89	74.17	0.4487	D	e	F
GxA 3x6	10	318367.6*	90.39	96.05	-0.1292	D	e	D
GxA 3x7	10	302831*	99.99	85.93	0.2614	D	e	F
GxA 3x8	10	190645.3 ^{ns}	97.59	70.91	0.4719	D	e	D
GxA 3x9	10	257186 ^{ns}	81.69	80.46	0.0297	D	e	D
GxA 3x10	10	223134.8 ^{ns}	54.76	54.16	0.0216	D	e	D
GxA 4x5	10	315010*	93.10	91.40	0.0361	F	e	F
GxA 4x6	10	234333.6 ^{ns}	99.20	112.41	-0.284	F	e	D
GxA 4x7	10	296597.4*	94.53	92.74	0.0374	F	e	F
GxA 4x8	10	260119.5*	98.42	99.54	-0.0229	F	e	D
GxA 4x9	10	101540.7 ^{ns}	92.83	72.67	0.3872	F	e	D
GxA 4x10	10	121452.9 ^{ns}	71.52	70.76	0.021	F	e	D
GxA 5x6	10	401358.4**	90.95	107.02	-0.3846	F	e	D
GxA 5x7	10	381512.6**	99.89	94.69	0.1014	F	e	F
GxA 5x8	10	321044.1*	97.82	90.81	0.1382	F	e	D
GxA 5x9	10	134858.9 ^{ns}	59.84	35.92	0.6397	F	e	D
GxA 5x10	10	265645.1*	58.15	63.59	-0.1957	F	e	D
GxA 6x7	10	150970.1 ^{ns}	80.74	56.11	0.517	D	e	F
GxA 6x8	10	291008.2*	96.05	109.04	-0.2889	D	e	D
GxA 6x9	10	184378 ^{ns}	99.03	115.92	-0.37	D	e	D
GxA 6x10	10	55172.71 ^{ns}	63.02	42.38	0.5477	D	e	D
GxA 7x8	10	370891.5**	98.91	101.432	-0.0515	F	e	D
GxA 7x9	10	227350.2 ^{ns}	80.11	73.84	0.1505	F	e	D

GxA 7x10	10	150673.6 ^{ns}	34.84	22.70	0.5755	F	e	D
GxA 8x9	10	232331.9 ^{ns}	90.41	96.53	-0.14	D	e	D
GxA 8x10	10	194894.4 ^{ns}	67.94	75.84	-0.246	D	e	D
GxA 9x10	10	62457.61 ^{ns}	83.76	74.96	0.199	D	e	D

As estimativas individuais de decomposição para os 45 pares de locais revelaram que os índices de complexidade (%C1 e %C2) mantiveram-se acima de 90% em praticamente todas as interações significativas. O par Araucária (A2) × Holambra (A5), ambos ambientes favoráveis, apresentou uma ecovalência extrema com QM = 832.378,00, correlação fenotípica negativa ($r = -0,4058$) e índices de complexidade elevados (%C1 = 97,55% e %C2 = 115,67%), confirmando que fortes efeitos crossover ocorrem mesmo dentro de cenários tecnológicos favoráveis.

Tabela 10. Resumo da decomposição conjunta e estratificação dos pares de ambientes de acordo com favorabilidade edafoclimática.

Estatística / Detalhamento	Quantidade de Pares	Proporção (%)
Total de pares de interações possíveis	45	100,00%
Interações não significativas	22	48,89%
Interações significativas (G×A pareada)	23	51,11%
Interações significativas complexas (%C1)	22 de 23	95,65%
- Envolvendo ambientes Favorável × Favorável	8 de 22	36,36%
- Envolvendo ambientes Desfavorável × Desfavorável	2 de 22	9,09%
- Envolvendo ambientes Favorável × Desfavorável	12 de 22	54,55%
Interações significativas complexas (%C2)	21 de 23	91,30%
- Envolvendo ambientes Favorável × Favorável	8 de 21	38,09%
- Envolvendo ambientes Desfavorável × Desfavorável	2 de 21	9,52%
- Envolvendo ambientes Favorável × Desfavorável	11 de 21	52,38%

A avaliação individualizada revelou que, dos 45 pares de ambientes possíveis, 22 interações foram não significativas (48,89%) e 23 apresentaram significância estatística (51,11%) (Tabela 10). A expressiva proporção de interações não significativas indica que, em quase metade das comparações pareadas, o ranqueamento relativo do germoplasma permaneceu consistente. Como exemplo prático de estabilidade, o desempenho dos genótipos entre os

ambientes 5 (Holambra - F) e 9 (Rio Verde - D) apresentou uma correlação fenotípica positiva e moderada ($r = 0,6397$), com interação $G \times A$ não significativa (Tabela 9). Esse padrão evidencia que o ordenamento dos materiais genéticos tendeu a se manter estável ao transitar entre essas duas localidades, apesar de pertencerem a classes de favorabilidade ambiental distintas.

Por outro lado, quando a interação $G \times A$ foi significativa, observou-se uma nítida e expressiva predominância da fração complexa, que superou os 90% da variação associada à interação (Tabelas 9 e 10). Com base nos estimadores de Robertson (1959) e Cruz e Castoldi (1991), a fração complexa respondeu por 95,65% (%C1) e 91,30% (%C2) das interações significativas, respectivamente (Tabela 10). Essa predominância revela que a resposta diferencial dos genótipos não decorre meramente de variações de escala ou de magnitude de desempenho, mas sim de alterações severas no ranqueamento relativo entre as localidades (efeito crossover). Um caso extremo de complexidade foi verificado na comparação dos ambientes 2 (Araucária - F) e 5 (Holambra - F), que apresentou interação altamente significativa ($QM = 832.378,00$), correlação negativa ($r = -0,4058$) e elevados índices de complexidade (%C1 = 97,55% e %C2 = 115,67%) (Tabela 9).

Ao estratificar essas interações conforme a favorabilidade ambiental (Tabela 10), constata-se que a manifestação de complexidade é maximizada quando envolve pares de ambientes contrastantes (favorável $\times$ desfavorável), correspondendo a 54,55% (%C1) e 52,38% (%C2) das interações complexas significativas. Esse comportamento sugere que os programas de melhoramento, ao buscarem padrões genotípicos específicos, acabam gerando materiais altamente sensíveis a oscilações no nível tecnológico e edafoclimático das áreas de cultivo. No entanto, a complexidade não é exclusiva dessas condições contrastantes: interações entre ambientes favoráveis $\times$ favoráveis responderam por 36,36% (%C1) e 38,09% (%C2) do total significativo complexo, evidenciando que mesmo sob condições ideais de cultivo ocorrem alterações importantes na classificação de genótipos de alto potencial produtivo.

A acentuada contribuição da fração complexa em ensaios multiambientes de feijoeiro-comum é corroborada pela literatura. Autores como Torga et al. (2013) e Nascimento et al. (2022) também identificaram a predominância desse tipo de interação em redes experimentais, associando o fenômeno à alta variabilidade ambiental e à sensibilidade ecofisiológica da cultura. Segundo Cruz, Regazzi e Carneiro (2014), a predominância da interação complexa representa um dos cenários mais desafiadores para o melhoramento vegetal, uma vez que limita

drasticamente a eficácia de recomendações amplas pautadas exclusivamente em médias gerais. Portanto, torna-se imperativa a aplicação de métodos biométricos robustos de adaptabilidade e estabilidade para mitigar riscos e viabilizar indicações regionalizadas de cultivo.

A representação gráfica por meio da rede experimental (Figura 5) possibilita uma análise integrada e concomitante da caracterização dos ambientes de teste, do padrão estatístico da interação genótipo por ambiente estabelecida entre cada par de locais e do ranqueamento relativo dos materiais genéticos superiores. Os dez locais avaliados foram categorizados com base no seu índice ambiental em ambientes favoráveis, representados pelos municípios de Anápolis (A1), Araucária (A2), Formosa (A4), Holambra (A5) e Planaltina (A7), e desfavoráveis, constituídos por Criciúma (A3), Londrina (A6), Prudentópolis (A8), Rio Verde (A9) e Sete Lagoas (A10). Essa classificação reflete a variabilidade edafoclimática entre as regiões produtoras de feijoeiro-comum, em que locais com índices favoráveis permitiram aos genótipos expressar seu potencial genético acima da média geral do experimento, ao passo que os ambientes desfavoráveis impuseram limitações edáficas ou climáticas ao rendimento de grãos.

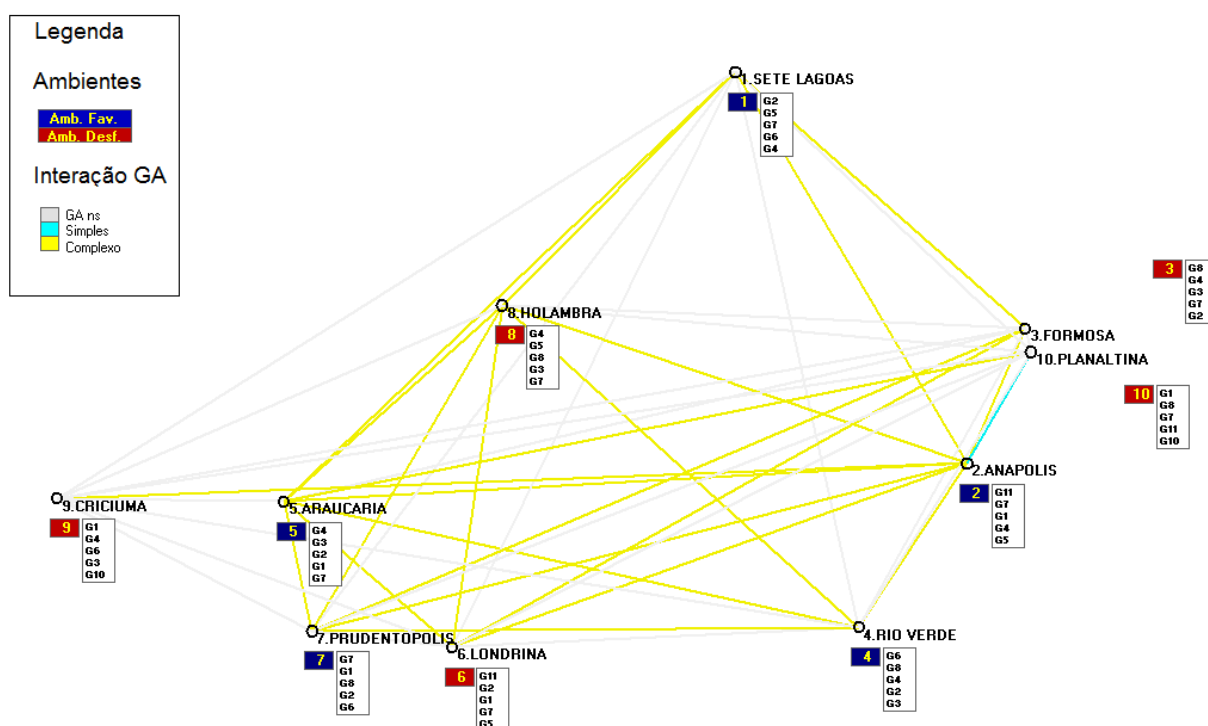


Figura 5. Rede experimental destacando os ambientes que são favoráveis ou desfavoráveis e os pares que proporcionam interação não significativa, simples ou complexa. Em cada ambiente estão destacados os quatro genótipos de melhor desempenho.

No tocante às conexões estabelecidas entre os pares de ambientes, observa-se uma nítida predominância de interações do tipo complexa, representadas no grafo pelas arestas em tom

amarelo. Essa alta densidade de conexões amarelas demonstra que a variação fenotípica entre a grande maioria dos locais avaliados foi governada por alterações marcantes na ordem de classificação dos genótipos, caracterizando o fenômeno do crossover. Essa complexidade manifestou-se de forma expressiva nos pares compostos por combinações entre ambientes favoráveis e desfavoráveis, evidenciando que a superioridade expressa por determinados genótipos em condições ótimas de cultivo não se manteve quando submetidos a ambientes restritivos.

Por outro lado, a ocorrência de interação do tipo simples deu-se de maneira pontual, restrita unicamente à conexão entre os ambientes de Anápolis (A1) e Planaltina (A7), indicada pela aresta em cor ciano. Essa resposta específica indica que as diferenças fenotípicas entre esses dois locais decorreram prioritariamente de variações na magnitude de desempenho dos genótipos, sem alteração relevante na sua ordem de classificação. Adicionalmente, as interações não significativas, destacadas pelas linhas cinza-claras no grafo, associaram pares de ambientes nos quais o comportamento relativo do germoplasma se manteve consistente e estável, como observado entre o ambiente de Criciúma (A3) e outros locais específicos.

A avaliação dos materiais de melhor desempenho por ambiente, discriminados nas caixas de texto associadas a cada nó da rede, corrobora a elevada variabilidade no ranqueamento dos genótipos e reflete a complexidade da interação observada. O genótipo G11 (IPR Uirapuru) destacou-se na liderança da produtividade de grãos nos ambientes de Anápolis e Londrina, enquanto o genótipo G4 (CNFP16404) obteve o primeiro lugar nos ensaios de Araucária e Holambra. O genótipo G1 (CNFP16459) sobressaiu-se nos ambientes desfavoráveis de Criciúma e Planaltina, e o genótipo G7 (CNFP16384) figurou de maneira consistente entre as primeiras colocações nos ambientes favoráveis de Prudentópolis, Sete Lagoas e Anápolis. Nos demais locais, a liderança foi assumida por genótipos específicos, a exemplo do G2 (CNFP16416) em Sete Lagoas, do G8 (BRS Esteio) em Formosa e do G6 (CNFP16380) em Rio Verde. Esse comportamento altamente especializado reforça que a recomendação ampla de cultivares pautada exclusivamente em médias gerais é pouco eficiente, sendo em detrimento de uma indicação pautada em adaptabilidade e estabilidade regionalizada.

4.5. Análise Multi-informação para Recomendação de Cultivares

A escolha de um método biométrico de adaptabilidade e estabilidade influencia diretamente a classificação dos genótipos, frequentemente resultando em recomendações divergentes ou inconsistentes devido aos diferentes pressupostos estatísticos e parâmetros

interpretativos de cada metodologia. Diante dessa limitação, a análise multi-informação estabelece-se como uma estratégia integrativa inovadora. Em vez de adotar um fluxo analítico pautado na aplicação isolada de múltiplos métodos para posterior comparação, esta abordagem realiza um procedimento inverso: elege-se, a priori, os genótipos de maior interesse agrônomo e, por meio de uma estrutura de meta-análise, agregam-se parâmetros que descrevem seu potencial produtivo, plasticidade, previsibilidade e estabilidade em uma ficha de desempenho única.

Dessa forma, os resultados dos métodos clássicos baseados em decomposição da variância (Plaisted & Peterson, Wricke e Shukla), regressão linear (Finlay & Wilkinson, Eberhart & Russell, Tai e regressão bissegmentada), medidas de superioridade e risco (Lin & Binns, Annicchiarico e Centroides) são explorados de maneira complementar e concomitante, reduzindo a subjetividade do melhorista e maximizando a segurança das recomendações gerais ou regionalizadas. A síntese dos resultados obtidos para os métodos analisados pode ser vista na Tabela 11.

Tabela 11. Síntese da classificação dos genótipos quanto à adaptação a ambientes favoráveis, desfavoráveis ou adaptação geral, bem como quanto à estabilidade fenotípica, com base em diferentes métodos biométricos.

Genótipo	WK / SK / PP	FW / ER / TA	RB	LB	AN	MI
CNFP16459	Estável	Geral e estável	Geral	4	3	Favorável e muito estável
CNFP16416	Estável	Favoráveis e instável	Favorável	3	2	Favorável e estável
CNFP16379	Instável	Geral e instável	Geral	9	9	Desfavorável e instável
CNFP16404	Moderadamente estável	Favoráveis e instável	Favorável	2	4	Geral alta e estável
CNFP16383	Estável	Geral e estável	Favorável	5	6	Geral mediana e muito estável
CNFP16380	Instável	Favoráveis e instável	Favorável	7	7	Geral mediana e estável
CNFP16384	Instável	Favoráveis e instável	Favorável	1	1	Geral alta e estável
BRS Esteio	Muito instável	Desfavoráveis e instável	Desfavorável	6	5	Desfavorável e instável
BRS FP403	Muito estável	Desfavoráveis e estável	Desfavorável	11	10	Geral mediana e muito estável
IPR Tuiuiú	Estável	Desfavoráveis e estável	Desfavorável	10	11	Geral mediana e muito estável
IPR Uirapurú	Extremamente instável	Geral e instável	Geral	8	8	Geral mediana e muito instável

Legenda: WK: Wricke; SK: Shukla; PP: Plaisted e Peterson; FW: Finlay e Wilkinson; ER: Eberhart e Russell; TA: Tai; RB: regressão bissegmentada; Para LB (Lin e Binns) e AN (Annicchiarico), os valores numéricos representam o ranking de desempenho dos genótipos. MI: multi-informação.

4.5.1. Perfil Biométrico e Ficha de Desempenho dos Genótipos Elite

Para a consolidação da análise de multi-informação, foram selecionados os quatro genótipos de maior potencial produtivo geral do ensaio: as linhagens elite CNFP16384 (G7), CNFP16404 (G4), CNFP16416 (G2) e CNFP16459 (G1).

a) Linhagem CNFP16384 (G7): O Genótipo de Máximo Teto Produtivo

A linhagem CNFP16384 (G7) consolidou-se como o material de maior potencial produtivo da rede experimental, liderando o ranqueamento de produtividade média geral (2.857,87 kg ha⁻¹) e de ambientes favoráveis (3.662,20 kg ha⁻¹).

Sob a ótica da estabilidade e previsibilidade (Tabela 12), a análise de multi-informação revela particularidades importantes sobre o comportamento da G7.

Tabela 12. Síntese dos descritores biométricos considerados na recomendação final da linhagem de feijoeiro CNFP16384 (G7), por meio da análise multi-informação.

Descritor	Valor	Rank	Referência
1. Potencial médio			
- Amb. Geral	2857,8	1	[2426,4667 , 2857,8667 *] $\mu = 2644,6909$
- Amb. Favorável	3662,2	1	[3064,8667 , 3662,2000 *] $\mu = 3337,0545$
- Amb. Desfavorável	2053,5	3	[1788,0667 , 2161,4667 *] $\mu = 1952,3273$
2. Plasticidade QMG/A	2819627,1	9	[*1855699,7185 , 876380,1482]
3. Contribuição Interação			
- S ² gxa	9,1963 %	7	[*3,2211 , 22,5130]
- SQ gxa	9,2014 %	7	[*2,9370 , 23,1627]
4. Índice de recomendação - (1 - alfa = 0,90)			
- Amb. Geral	96,61 %	1	[80,0517 , 96,6118 *]
- Amb. Desfavorável	101,87 %	1	[78,8076 , 101,8757 *]
- Amb. Favorável	94,77 %	4	[72,8806 , 97,2837 *]
5. Adaptabilidade	1,0873	ns	[,8798 , 1,1079]
6. Estabilidade	91,18 %	*	[75,2544 , 96,4471]
7. Padrão J de resposta			
Adaptabilidade B1	1,1432	ns	[,8263 , 1,1432]
Adaptabilidade B1+B2	0,4855	ns	[,4566 , 1,4561]
Estabilidade	93,7757 %	ns	[75,5420 , 96,5066]
8. Padrão de campeão			
Amb. Geral	81399,68	1	[*81399,6833 , 354768,4056]
Amb. Favorável	106072,52	1	[*106072,5222 , 533281,9000]
Amb. Desfavorável	56726,84	3	[*23526,3222 , 220013,6222]
9. Índice de recomendação			
4 Centroides		1	Classe I : Adaptabilidade geral alta
7 Centroides		6	Classe VI : Adaptabilidade específica a ambientes favoráveis

1) Referência é a amplitude de variação encontrada para a estatística

2) O símbolo *, destacado na Referência, indica o valor associado ao rank igual a 1

O detalhamento deste genótipo pode ser sintetizado a seguir:

Estabilidade Geral: Apresentou um índice de estabilidade estimado de 91,18%. No entanto, por ser um material altamente responsivo e de elevado teto, registrou uma contribuição de 9,20% para a soma de quadrados da interação genótipos $\times$ ambientes (SQ_G $\times$ A), o que a classificou como instável pelos métodos de Wricke (WK), Shukla (SK) e Plaisted e Peterson (PP).

Adaptabilidade e Plasticidade: O coeficiente de regressão linear de Eberhart & Russell foi superior à unidade ($\beta_i = 1,0873$), indicando alta sensibilidade e adaptabilidade específica a ambientes favoráveis. Esse comportamento é referendado pela classificação pelo método dos sete centroides na Classe VI (Adaptabilidade específica a ambientes favoráveis), o que justifica sua recomendação prioritária para sistemas produtivos de alto nível tecnológico (Nascimento et al., 2024).

Rendimento em Condições Limitantes: Apesar de sua classificação voltada para ambientes favoráveis, a linhagem registrou o maior índice de recomendação para o cenário desfavorável (101,88%) e o terceiro maior rendimento médio em locais restritivos (2.053,53 kg ha⁻¹), o que a posiciona também como uma opção extremamente robusta para plantios gerais de menor risco.

b) Linhagem CNFP16404 (G4): Rusticidade e Estabilidade sob Restrição

A linhagem CNFP16404 (G4) caracterizou-se por um excelente equilíbrio entre teto produtivo e rusticidade, alcançando a segunda colocação em produtividade média geral (2.800,00 kg ha⁻¹) e em ambientes desfavoráveis (2.102,00 kg ha⁻¹). Suas características podem ser detalhadas na Tabela 13.

Tabela 13. Síntese dos descritores biométricos considerados na recomendação final da linhagem de feijoeiro CNFP16404 (G4), por meio da análise multi-informação.

Descritor	Valor	Rank	Referência
1. Potencial médio			
- Amb. Geral	2800,0	2	[2426,4667 , 2857,8667 *] $\mu = 2644,6909$
- Amb. Favorável	3498,0	3	[3064,8667 , 3662,2000 *] $\mu = 3337,0545$
- Amb. Desfavorável	2102,0	2	[1788,0667 , 2161,4667 *] $\mu = 1952,3273$
2. Plasticidade QMG/A	2876380,1	11	[*1855699,7185,876380,1482]
3. Contribuição Interação			
- S ² gxa	8,1075 %	6	[*3,2211 , 22,5130]
- SQ gxa	8,0599 %	6	[*2,9370 , 23,1627]
4. Índice de recomendação - (1 - alfa = 0,90)			
- Amb. Geral	89,2199 %	4	[80,0517 , 96,6118 *]
- Amb. Desfavorável	83,6107 %	7	[78,8076 , 101,8757 *]
- Amb. Favorável	95,0684 %	3	[72,8806 , 97,2837 *]

5. Adaptabilidade	1,1079	ns	[,8798 , 1,1079]
6. Estabilidade	92,8024 %	ns	[75,2544 , 96,4471]
7. Padrão J de resposta			
Adaptabilidade B1	1,0976	ns	[,8263 , 1,1432]
Adaptabilidade B1+B2	1,2191	ns	[,4566 , 1,4561]
Estabilidade	92,8893 %	ns	[75,5420 , 96,5066]
8. Padrão de campeão			
Amb. Geral	137210,2	2	[*81399,6833 , 354768,4056]
Amb. Favorável	225688,8	4	[*106072,5222 , 533281,9000]
Amb. Desfavorável	48731,7	2	[*23526,3222 , 220013,6222]
9. Índice de recomendação			
4 Centroides		1	Classe I : Adaptabilidade geral alta
7 Centroides		7	Classe VII : Adaptabilidade específica a ambientes desfavoráveis

1) Referência é a amplitude de variação encontrada para a estatística

2) O símbolo *, destacado na Referência, indica o valor associado ao rank igual a 1

Os descritores de adaptabilidade e estabilidade integrados na sua ficha de desempenho revelam:

Padrão de Resposta: Pelo método de regressão linear de Eberhart & Russell, apresentou $\beta_i = 1,1079$, indicando sensibilidade às melhorias ambientais. Contudo, na decomposição por regressão bissegmentada, registrou um coeficiente $\beta_1 = 1,0976$ associado aos locais desfavoráveis, evidenciando que sua resposta diferencial é fortemente ativada mesmo sob limitações edafoclimáticas.

Classificação por Centroides: Pelo método clássico de 4 centroides, foi alocada na Classe I (Adaptabilidade geral alta). Todavia, o refinamento da análise de multi-informação para 7 centroides alocou-a na Classe VII (Adaptabilidade específica a ambientes desfavoráveis), amparada pela baixíssima distância euclidiana em relação ao ideótipo desfavorável.

Previsibilidade: Sua contribuição para a interação $G \times A$ foi moderada ($\sigma_{ga}^2 = 8,11\%$), com estabilidade geral estimada em 92,80%.

c) Linhagem CNFP16416 (G2): Alto Desempenho e Plasticidade Regulada

A linhagem CNFP16416 (G2) destacou-se pela excelente performance em ambientes favoráveis, alcançando a segunda maior produtividade média sob essas condições (3.554,40 kg ha⁻¹) e o segundo maior índice de recomendação favorável (96,73%). Suas características podem ser detalhadas na Tabela 14.

Tabela 14. Síntese dos descritores biométricos considerados na recomendação final da linhagem de feijoeiro CNFP16416 (G2), por meio da análise multi-informação.

Descritor	Valor	Rank	Referência
-----------	-------	------	------------

1. Potencial médio			
- Amb. Geral	2756,5	3	[2426,4667 , 2857,8667 *] $\mu = 2644,6909$
- Amb. Favorável	3554,4	2	[3064,8667 , 3662,2000 *] $\mu = 3337,0545$
- Amb. Desfavorável	1958,7	6	[1788,0667 , 2161,4667 *] $\mu = 1952,3273$
2. Plasticidade QMG/A	2501078,3	6	[*1855699,7185 , 2876380,1482]
3. Contribuição Interação			
- S ² gxa	6,2991 %	5	[*3,2211 , 22,5130]
- SQ gxa	6,1640 %	5	[*2,9370 , 23,1627]
4. Índice de recomendação - (1 - alfa = 0,90)			
- Amb. Geral	92,5454 %	2	[80,0517 , 96,6118 *]
- Amb. Desfavorável	88,4443 %	3	[78,8076 , 101,8757 *]
- Amb. Favorável	96,7338 %	2	[72,8806 , 97,2837 *]
5. Adaptabilidade	1,0342	ns	[,8798 , 1,1079]
6. Estabilidade	92,9970 %	ns	[75,2544 , 96,4471]
7. Padrão J de resposta			
Adaptabilidade B1	1,0789	ns	[,8263 , 1,1432]
Adaptabilidade B1+B2	0,5527	ns	[,4566 , 1,4561]
Estabilidade	94,8705 %	ns	[75,5420 , 96,5066]
8. Padrão de campeão			
Amb. Geral	153343,6	3	[*81399,6833 , 354768,4056]
Amb. Favorável	190364,1	3	[*106072,5222 , 533281,9000]
Amb. Desfavorável	116323,2	5	[*23526,3222 , 220013,6222]
9. Índice de recomendação			
4 Centroides		2	Classe II : Adaptabilidade específica a ambientes favoráveis
7 Centroides		5	Classe V : Adaptabilidade geral mediana

1) Referência é a amplitude de variação encontrada para a estatística

2) O símbolo *, destacado na Referência, indica o valor associado ao rank igual a 1

A integração de seus parâmetros biométricos aponta:

Estabilidade e Interação: Apresentou uma das menores contribuições para a variância da interação genótipos $\times$ ambientes ($\sigma_{ga}^2 = 6,30\%$) e elevada estabilidade fenotípica geral (92,99%). Essa consistência comportamental garantiu sua classificação como estável pelos métodos univariados de Wricke e Shukla e pelo parâmetro λ_i de Tai.

Adaptabilidade: Seu coeficiente de regressão linear ($\beta_i = 1,0342$) foi estatisticamente igual a 1, indicando adaptabilidade geral. No entanto, o desdobramento da regressão bissegmentada revelou um coeficiente para ambientes favoráveis negativo ($\beta_{2i} = -0,5263$), indicando que a linhagem tende a estabilizar seu rendimento relativo quando transita para condições de altíssimo teto tecnológico.

Classificação por Centroides: Foi enquadrada na Classe II (Adaptabilidade específica a ambientes favoráveis) pelo método de 4 centroides, evidenciando que seu potencial genético é plenamente expresso quando há melhoria nas condições de cultivo, justificando sua recomendação preferencial para ambientes favoráveis.

d) Linhagem CNFP16459 (G1): Homogeneidade e Baixo Risco de Cultivo

A linhagem CNFP16459 (G1) apresentou o comportamento mais estável e homogêneo entre as linhagens elite avaliadas, aliando um potencial produtivo médio geral competitivo ($2.717,20 \text{ kg ha}^{-1}$) a uma alta previsibilidade. Seus descritores biométricos são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. Síntese dos descritores biométricos considerados na recomendação final da linhagem de feijoeiro CNFP16459 (G1), por meio da análise multi-informação.

Descritor	Valor	Rank	Referência
1. Potencial médio			
- Amb. Geral	2717,2	4	[2426,4667 , 2857,8667 *] $\mu = 2644,6909$
- Amb. Favorável	3454,2	4	[3064,8667 , 3662,2000 *] $\mu = 3337,0545$
- Amb. Desfavorável	1980,2	4	[1788,0667 , 2161,4667 *] $\mu = 1952,3273$
2. Plasticidade QMG/A	2250891,5	4	[*1855699,7185 , 2876380,1482]
3. Contribuição Interação			
- S^2_{gxa}	5,4399 %	3	[*3,2211 , 22,5130]
- SQ_{gxa}	5,2632 %	3	[*2,9370 , 23,1627]
4. Índice de recomendação - (1 - alfa = 0,90)			
- Amb. Geral	90,9675 %	3	[80,0517 , 96,6118 *]
- Amb. Desfavorável	85,8393 %	5	[78,8076 , 101,8757 *]
- Amb. Favorável	97,2837 %	1	[72,8806 , 97,2837 *]
5. Adaptabilidade	0,9826	ns	[,8798 , 1,1079]
6. Estabilidade	93,2885 %	ns	[75,2544 , 96,4471]
7. Padrão J de resposta			
Adaptabilidade B1	0,9817	ns	[,8263 , 1,1432]
Adaptabilidade B1+B2	0,9922	ns	[,4566 , 1,4561]
Estabilidade	93,2893 %	ns	[75,5420 , 96,5066]
8. Padrão de campeão			
Amb. Geral	165015,8	4	[*81399,6833 , 354768,4056]
Amb. Favorável	180285,3	2	[*106072,5222 , 533281,9000]
Amb. Desfavorável	149746,2	7	[*23526,3222 , 220013,6222]
9. Índice de recomendação			
4 Centroides		2	Classe II : Adaptabilidade específica a ambientes favoráveis
7 Centroides		5	Classe V : Adaptabilidade geral mediana

1) Referência é a amplitude de variação encontrada para a estatística

2) O símbolo *, destacado na Referência, indica o valor associado ao rank igual a 1

Seus descritores integrados na análise multi-informação indicam:

Previsibilidade Superior: Registrou uma contribuição extremamente reduzida para a interação genótipos $\times$ ambientes ($SQ_{\text{ga}} = 5,26\%$), associada a uma estabilidade de 93,28% e baixos desvios de regressão ($\sigma_{di}^2 = 10.930,60$). Esse comportamento consistente garantiu sua classificação como estável e com alta previsibilidade em praticamente todos os métodos univariados (Wricke, Shukla, Plaisted & Peterson e Tai).

Segurança e Recomendação: Apresentou o maior índice de recomendação para ambientes favoráveis (97,28%), classificando-se na Classe II (4 centroides) e na Classe V (Adaptabilidade geral mediana para 7 centroides).

Adaptabilidade: Seu coeficiente $\beta_i = 0,9826$ (próximo à unidade) a caracteriza como um material de adaptabilidade geral perfeita, ideal para recomendação ampla em sistemas de cultivo em que o nível tecnológico futuro é desconhecido, minimizando os riscos de oscilação fenotípica.

4.5.2. Caracterização dos Materiais Comerciais e de Uso Secundário

A análise multi-informação estendeu-se também às cultivares comerciais e aos materiais que apresentaram restrições de cultivo, permitindo caracterizar detalhadamente suas limitações e potenciais específicos.

a) Cultivares Comerciais BRS FP403 (G9) e IPR Tuiuiú (G10): Estabilidade Máxima com Limitação de Teto

As cultivares de feijão preto BRS FP403 (G9) e carioca IPR Tuiuiú (G10) apresentaram um comportamento biométrico altamente conservador. Ambas se destacaram como os materiais mais estáveis e previsíveis de todo o ensaio, apresentando ecovalências de Wricke (W_i) e variâncias de Shukla (σ_i^2) extremamente baixas e desvios de regressão praticamente nulos. No entanto, essa estabilidade excepcional foi acompanhada de um reduzido potencial produtivo médio, o que as posicionou no grupo inferior nos ambientes favoráveis (Tabela 6) e nos maiores valores de P_i (distância do máximo) de Lin & Binns. Pelo método de regressão bissegmentada, apresentaram coeficientes para ambientes desfavoráveis inferiores à unidade ($\beta_{li} < 1$), o que, aliado à sua robustez temporal, fundamenta suas indicações para cultivo restrito em ambientes desfavoráveis ou sob condições de baixa tecnologia.

b) BRS Esteio (G8) e IPR Uirapuru (G11): Alta Especialização e Inconsistência Temporal

As cultivares BRS Esteio (G8) e IPR Uirapuru (G11) demonstraram padrões de resposta altamente especializados, porém associados a elevado risco de cultivo devido à acentuada instabilidade.

A cultivar BRS Esteio (G8) alcançou o maior rendimento médio nos ambientes desfavoráveis (2.161,50 kg ha⁻¹). No entanto, sua ecovalência de Wricke e variância de Shukla foram extremamente elevadas, classificando-a como muito instável. Adicionalmente, apresentou o maior coeficiente β_{2i} positivo na regressão bissegmentada, revelando que, embora

seja rústica, seu comportamento oscila drasticamente e depende de condições específicas para responder, sendo alocada na Classe III (Adaptabilidade específica a ambientes desfavoráveis) (Breda et al., 2025).

A cultivar IPR Uirapuru (G11) obteve excelente desempenho em locais específicos, liderando a produtividade em Anápolis e Londrina, conforme mapeado pela rede experimental (Tabela 5). No entanto, foi classificada como extremamente instável pelos métodos baseados na decomposição da variância e apresentou o maior desvio de regressão linear ($\sigma_{di}^2 = 203.637,23$), o que a restringe a um uso secundário e específico devido ao elevado risco de perdas produtivas em ambientes ou safras menos favoráveis (Souza et al., 2023).

4.6. Síntese de Recomendação Prática

A interação genótipos $\times$ ambientes ($G \times A$) exerce um papel determinante na expressão fenotípica da produtividade de grãos do feijoeiro-comum, apresentando natureza predominantemente complexa. Esse comportamento evidencia alterações marcantes no ordenamento relativo dos genótipos ao longo dos locais de cultivo e comprova que a recomendação pautada exclusivamente em médias gerais de desempenho é insuficiente e limitada.

Os diferentes métodos biométricos de adaptabilidade e estabilidade atuam de forma estritamente complementar: as abordagens fundamentadas na decomposição da variância (Wricke, Shukla e Plaisted & Peterson) são eficientes em isolar e quantificar a estabilidade fenotípica geral; os modelos de regressão (Eberhart & Russell, Tai e regressão bissegmentada) discriminam com precisão os padrões de plasticidade e as respostas específicas a ambientes favoráveis ou restritivos; os índices de superioridade (Lin & Binns e Annicchiarico) ordenam com segurança os materiais sob a ótica do risco de recomendação.

A consolidação de todas as dimensões avaliadas pela análise multi-informação (Tabelas 12, 13, 14 e 15) permitiu estruturar a recomendação final de cultivo de forma integrada (Tabela 16), gerando indicações precisas e seguras para cada nível de favorabilidade ambiental do feijoeiro-comum.

Tabela 16. Recomendação final dos genótipos de feijoeiro para diferentes condições ambientais, obtida a partir da integração dos resultados dos métodos de adaptabilidade e estabilidade e dos descritores empregados na análise multi-informação.

Situação de cultivo	Genótipos recomendados	Fundamentação Biométrica Baseada na Multi-informação
Geral (ampla adaptação)	CNFP16459 e CNFP16383	Genótipos de adaptabilidade geral ($\beta_i \approx 1$), elevada previsibilidade (σ_{di}^2 baixos) e comportamento equilibrado entre rendimento e estabilidade.
Ambientes favoráveis	CNFP16384, CNFP16404 e CNFP16416	Materiais de elevado teto produtivo, responsivos às melhorias ambientais ($\beta_i > 1$ ou Classe II de centroides), ideais para sistemas de alto nível tecnológico.
Ambientes desfavoráveis	BRS FP403 e IPR Tuiuiú	Cultivares caracterizadas por máxima estabilidade fenotípica (WK e SK) e baixa penalização sob estresses ou restrições edafoclimáticas ($\beta_i < 1$).
Uso secundário	CNFP16380, CNFP16379, BRS Esteio e IPR Uirapurú	Materiais de elevado potencial produtivo em locais específicos, mas penalizados pela alta instabilidade fenotípica e elevado risco de recomendação ampla.

A convergência de dados proporcionada pela análise multi-informação demonstra que a recomendação pautada unicamente em médias gerais de produtividade é insuficiente. A identificação de materiais que conjugam alto potencial a uma plasticidade previsível (como as linhagens CNFP16384 e CNFP16404) atesta o sucesso do programa de melhoramento genético do feijoeiro em selecionar genótipos robustos e adaptados à diversidade real das condições de cultivo brasileiras.

A análise multi-informação consolida-se como uma metodologia integrativa pioneira e de alta precisão biométrica. Ao agregar de forma integrada múltiplos parâmetros estatísticos em uma ficha de desempenho focada nos genótipos de interesse, essa abordagem elimina a subjetividade de recomendações baseadas em métodos isolados e maximiza a confiabilidade das indicações tecnológicas para a lavoura.

5. CONCLUSÕES

A análise conjunta dos ensaios multiambientes conduziu às seguintes conclusões:

Com base na integração dos parâmetros biométricos, as linhagens CNFP16459 e CNFP16383 apresentam ampla adaptabilidade e estabilidade previsível, sendo indicadas para recomendação geral (cultivo amplo).

As linhagens CNFP16384, CNFP16404 e CNFP16416 expressam elevado potencial genético e alta responsividade técnica, sendo recomendadas especificamente para ambientes favoráveis de cultivo (Anápolis, Planaltina, Araucária, Holambra e Formosa).

As cultivares BRS FP403 e IPR Tuiuiú demonstram estabilidade fenotípica robusta e adaptabilidade voltada a condições limitantes, sendo indicadas para cultivo em ambientes desfavoráveis (Sete Lagoas, Londrina, Criciúma, Rio Verde e Prudentópolis).

Os genótipos CNFP16380, CNFP16379, BRS Esteio e IPR Uirapuru são classificados como materiais de uso secundário, em decorrência de restrições associadas à instabilidade fenotípica, adaptabilidade restrita ou oscilações severas em seus níveis de desempenho relativo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADÃO, A. **Adaptabilidade e estabilidade da produtividade de grãos de cultivares de feijão-comum em ambientes de Santa Catarina**. 2024. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2024.

ALVES, A. F.; MENEZES JÚNIOR, J. Â. N.; MENEZES, V. M. P. S.; CARNEIRO, J. E. S.; CARNEIRO, P. C. S.; Genetic progress and potential of common bean families obtained by recurrent selection. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 15, n. 4, p. 218-226, 2015. DOI: [<https://doi.org/10.1590/1984-70332015v15n4a38>].

ANNICCHIARICO, P. Cultivar adaptation and recommendation from alfalfa trials in Northern Italy. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 85, p. 136-140, 1992.

AREVALO, A. C. M.; SILVA, A. C.; ROCHA, D. K.; et al. Parâmetros genéticos, correlações e componentes principais em progênies de feijão-comum. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, e3179119831, 2020. DOI: [<https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.9831>].

BALDIN, R. C.; KAVALCO, S. A. F.; WOYANN, L. G.; RODRIGUES JUNIOR, A. A.; GOBATTO, D. R.; SILVA, G. R.; BENIN, G.; FINATTO, T. Yield stability of common bean genotypes in the state of Santa Catarina, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 56, 2021. DOI: [<https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02302>]

BARILI, L. D.; VALE, N. M.; PRADO, A. L.; CARNEIRO, J. E. S.; SILVA, F. F.; CARNEIRO, P. C. S. Genotype-environment interaction in common bean cultivars with carioca grain, recommended for cultivation in Brazil in the last 40 years. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 15, n. 4, p. 244-250, 2015. DOI: [<https://doi.org/10.1590/1984-70332015v15n4a41>]

BHERING, L. L. Rbío: a tool for biometric and statistical analysis using the R platform. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 17, p. 187-190, 2017.

BREDA, V. S. M. M.; DAHER, R. F.; NASCIMENTO, M. R.; SANTANA, J. G. S.; AMBRÓSIO, M.; VIDAL, A. K. F.; FREITAS, R. S.; SOUZA, A. G.; SANTOS, P. R.; XAVIER, J. V.; GRAVINA, G. A.; SOUZA FILHO, B. F.; COSTA, E. S. Genotype × environment interaction and estimates of grain yield adaptability and stability in black common bean genotypes in Brazil. **Crop Science**, Madison, v. 65, 2025. DOI: [<https://doi.org/10.1002/csc2.70213>]

CARLONI, P. R.; MELO, P. G. S.; MELO, L. C.; FARIA, L. C.; SOUZA, T. L. P. O.; ALMEIDA, V. M.; PEREIRA, H. S. Genotype by environment interaction in common bean cultivars for iron and zinc concentration in grains. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 43, n. 4, p. 1787-1804, 2022. DOI: [<https://doi.org/10.5433/1679-0359.2022v43n4p1787>]

CHABI, M.; BUTARE, L.; YEBOAH, S.; ASIBUO, J. Y.; ADETEMIRIN, V. O. Analysis of common bean (*Phaseolus vulgaris*) advanced lines for environmental interaction and grain yield stability. **Crop Breeding, Genetics and Genomics**, v. 7, n. 4, e250018, 2025. DOI: [<https://doi.org/10.20900/cbgg20250018>].

CHIMENEZ-FRANZON, R.; GONÇALVES-VIDIGAL, M. C.; VALENTINI, G.; MOIANA, L. D.; SOTO, R. I. C.; SOUSA, L. L.; VIDIGAL FILHO, P. S. Genetic parameters, yield adaptability and stability of common bean obtained through mixed models analyses. **Agronomy Science and Biotechnology**, v. 8, p. 1-16, 2022.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2025/26**. Brasília, DF: CONAB, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 18 fev. 2026.

COOPER, M.; DE LA VEGA, A. J.; STUTHMAN, D. D.; SCHMIDT, J. W. Genotype-by-environment interactions and their implications for plant breeding. **Crop Science**, Madison, v. 37, p. 345-356, 1997.

CRUZ, C. D. **GENES**: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. Viçosa: UFV, 2013.

CRUZ, C. D.; CASTOLDI, F. L. Decomposição da interação genótipos $\times$ ambientes em partes simples e complexa. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 38, n. 219, p. 422-430, 1991.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2014.

CRUZ, C. D.; TORRES, R. A.; VENCOSKY, R. An alternative approach to the stability analysis proposed by Silva and Barreto. **Revista Brasileira de Genética**, Ribeirão Preto, v. 12, p. 567-580, 1989.

DES MARAIS, D. L.; HERNANDEZ, K. M.; JUENGER, T. E. Genotype-by-environment interaction and plasticity: exploring genomic responses of plants to abiotic environment. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, Palo Alto, v. 44, p. 5-29, 2013.

EBERHART, S. A.; RUSSELL, W. A. Stability parameters for comparing varieties. **Crop Science**, Madison, v. 6, p. 36-40, 1966.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAOSTAT: crops and livestock products**. Rome: FAO, 2025. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat>. Acesso em: 18 fev. 2026.

FINLAY, K. W.; WILKINSON, G. N. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 14, p. 742-754, 1963.

GAUCH, H. G. A simple protocol for AMMI analysis of yield trials. **Crop Science**, Madison, v. 53, p. 1860-1869, 2013.

GELA, T. S.; KHAZAEI, H.; PODDER, R.; VANDENBERG, A. Dissection of genotype-by-environment interaction and simultaneous selection for grain yield and stability in faba bean (*Vicia faba* L.). **Agronomy Journal**, Madison, v. 115, p. 474-488, 2023. DOI: [<https://doi.org/10.1002/agj2.21268>].

HEINEMANN, A. B.; RAMIREZ-VILLEGAS, J.; STONE, L. F.; DIDONET, A. D. Climate change determined drought stress profiles in rainfed common bean production systems in Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 246, p. 64-77, 2017.

HEINEMANN, A. B.; MATTA, D. H.; STONE, L. F.; COSTA-NETO, G.; RESENDE, R. T.; GONÇALVES, P. A. O.; JUSTINO, L. F. Envirotyping-informed mixed models to study the climatic drivers and yield seasonal variation for common beans in Brazil. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 171, 2025. DOI: [<https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127821>].

KATUURAMU, D. N.; LUYIMA, G. B.; NKALUBO, S. T. et al. On-farm multi-location evaluation of genotype by environment interactions for seed yield and cooking time in common bean. **Scientific Reports**, London, v. 10, p. 3628, 2020. DOI: [<https://doi.org/10.1038/s41598-020-60087-2>]

LIN, C. S.; BINNS, M. R. A superiority measure of cultivar performance for cultivar $\times$ location data. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 68, p. 193-198, 1988.

MOGES, A. et al. Environmentally stable large red common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes using GGE biplot analysis. **Ethiopian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 1, p. 1-15, 2024.

NASCIMENTO, M. R. **Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de feijões**. 2022. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2022.

NOSSAL, L. C. **Adaptabilidade e estabilidade fenotípica em cultivares de feijão comum avaliadas em Erechim/RS**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 2025.

OLIVOTO, T.; LÚCIO, A. D.; SILVA, J. A. G.; MARCHIORO, V. S.; SOUZA, V. Q.; JOST, E. Mean performance and stability in multi-environment trials I: Combining features of AMMI and BLUP techniques. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2949-2960, 2019.

PEREIRA, H. S.; ALVARES, R. C.; SILVA, F. C.; FARIA, L. C.; MELO, L. C. Genetic, environmental and genotype $\times$ environment interaction effects on the common bean grain yield and commercial quality. **Semina: Ciências Agrárias**, [S. l.], v. 38, n. 3, p. 1241–1250, 2017. DOI: [<https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n3p1241>]. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/26106>.

PEREIRA, H. S.; MELO, L. C.; FARIA, L. C.; DEL PELOSO, M. J.; COSTA, J. G. C.; RAVA, C. A.; WENDLAND, A. Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de feijoeiro-comum com grãos tipo carioca na Região Central do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 1, p. 29-37, 2009.

RAMALHO, M. A. P.; FERREIRA, D. F.; OLIVEIRA, A. C. **Experimentação em genética e melhoramento de plantas**. 3. ed. Lavras: UFLA, 2012.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 18 fev. 2026.

ROBERTSON, A. The sampling variance of the genetic correlation coefficient. **Biometrics**, Raleigh, v. 15, p. 469-485, 1959.

SHUKLA, G. K. Some statistical aspects of partitioning genotype-environmental components of variability. **Heredity**, London, v. 29, p. 237-245, 1972.

TAI, G. C. C. Genotypic stability analysis and its application to potato regional trials. **Crop Science**, Madison, v. 11, p. 184-190, 1971.

WRICKE, G. Zur Berechnung der Ökovalenz bei Sommerweizen und Hafer. **Pflanzenzüchtung**, Berlin, v. 52, n. 1, p. 127-138, 1965.

YAN, W. GGE biplot: a Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 1111-1118, 2001.

YAN, W.; KANG, M. S. **GGE biplot analysis: a graphical tool for breeders, geneticists, and agronomists**. Boca Raton: CRC Press, 2003.

ZOBEL, R. W.; WRIGHT, M. J.; GAUCH, H. G. Statistical analysis of a yield trial. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, p. 388-393, 1988.

KLEIN, L. A.; MARCHIORO, V. S.; TOEBE, M.; OLIVOTO, T.; MEIRA, D.; ALBERTI, J. V.; FINATTO, J. L. B.; GARAFINI, D. C.; SCARAVONATTO, B.; AZEREDO, N. S.; ULBRIK, G.; OSMARI, C. F.; FOGUESATTO, C. B. Adaptability and stability of black oat genotypes using the GGE biplot analysis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 59, 2024. DOI:[<https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2024.v59.03483>].

LEITE, M. E.; DIAS, J. A.; SOUZA, D. A.; ALVES, F. C.; PINHEIRO, L. R.; SANTOS, J. B. Increasing the resistance of common bean to white mold through recurrent selection. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 73, p. 71-78, 2016.

LEMOS, L. B.; MINGOTTE, F. L. C.; FARINELLI, R. Cultivares. In: ARF, O.; LEMOS, L. B.; SORATTO, R. P.; FERRARI, S. **Aspectos gerais da cultura do feijão: Phaseolus vulgaris** L. Botucatu: UNESP/FEPAF, 2015. p. 181-207.

LOPES, F. S.; LEITE, M. E.; PORTO, A. C. M.; MIGUEL, L. A.; REIS, V. O. L.; SANTOS, J. B. Recurrent selection in common bean aiming at resistance to white mold in a greenhouse. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 19, p. 95-101, 2019.

MALOSETTI, M.; RIBAUT, J. M.; VAN EEUWIJK, F. A. The statistical analysis of multi-environment data: modeling genotype-by-environment interaction and its genetic basis. **Frontiers in Physiology**, Lausanne, v. 4, p. 44, 2013. DOI:[<https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00044>].

MELO, L. C.; MELO, P. G. S.; FARIA, L. C.; DIAZ, J. L. C.; DEL PELOSO, M. J.; RAVA, C. A.; COSTA, J. G. C. Interação com ambientes e estabilidade de genótipos de feijoeiro-comum na Região Centro-Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 5, p. 715-723, 2007. DOI:[<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000500015>].

MELO, C. L. P.; CARNEIRO, J. E. S.; CARNEIRO, P. C. S.; CRUZ, C. D.; BARROS, E. G.; MOREIRA, M. A. Linhagens de feijão do cruzamento ‘Ouro Negro’ × ‘Pérola’ com características agrônômicas favoráveis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 11, p. 1593-1598, 2006. DOI: [https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006001100004].

MELO, P. G. S.; ALVARES, R. C.; PEREIRA, H. S.; BRAZ, A. J. B. P.; FARIA, L. C.; MELO, L. C. Adaptability and stability of common bean genotypes in family farming systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 53, p. 189-196, 2018. DOI: [https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000200007].

MELO, G. G.; SANTOS, P. R.; GONÇALVES, R. J. S.; NASCIMENTO, M. R.; COSTA, A. F.; SILVA, J. W. Adaptability and stability of carioca bean pre-cultivars in Agreste-Sertão Pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 17, e1697, 2022. DOI: [https://doi.org/10.5039/agraria.v17i3a1697].

MORAES, E. S.; MENELAU, A. S. Análise do mercado de feijão comum. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 26, n. 1, p. 81-92, 2017.

MUTARI, B.; SIBIYA, J.; GASURA, E.; KONDWAKWENDA, A.; MATOVA, P. M.; CHIRWA, R. Genotype × environment interaction and stability analyses of grain yield and micronutrient (Fe and Zn) concentrations in navy bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes under varied production environments. **Field Crops Research**, Amsterdam, 2022. DOI: [https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108607].

NAPIER, J. D.; HECKMAN, R. W.; JUENGER, T. E. Gene-by-environment interactions in plants: molecular mechanisms, environmental drivers, and adaptive plasticity. **The Plant Cell**, Oxford, v. 35, n. 1, p. 109-124, 2023. DOI: [https://doi.org/10.1093/plcell/koac322].

NASCIMENTO, M. R.; DAHER, R. F.; AMARAL JÚNIOR, A. T.; GRAVINA, G. A.; SOUZA FILHO, B. F.; SOUZA, A. G.; AMBRÓSIO, M.; SANTANA, J. G. S.; VIDAL, A. K. F.; FREITAS, R. S.; LEITE, C. L.; SANTOS, P. R.; COSTA, A. F.; MELO, L. C. Selection of black bean pre-cultivars based on adaptability and stability for the State of Rio de Janeiro. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 84, 2024. DOI: [https://doi.org/10.1590/1519-6984.286241].

OLIVEIRA, C. F.; SOUZA, J. E.; SIQUEIRA, M. J. S.; SILVA JÚNIOR, A. C.; FERREIRA, R. P.; VILELA, D.; CRUZ, C. D. Selection of alfalfa genotypes for dry matter yield and persistence with repeated measures. **Agronomy Science and Biotechnology, Botucatu**, v. 9, p. 1-14, 2023. DOI: [https://doi.org/10.33158/ASB.r177.v9.2023].

PAULA JÚNIOR, T. J.; VIEIRA, R. F.; CARNEIRO, J. E. S.; RAMALHO, M. A. P.; ABREU, Â. F. B.; LIMA, R. C.; LEHNER, M. S. O programa de melhoramento do feijoeiro-comum no estado de Minas Gerais. In: **MELHORAMENTO genético no manejo de doenças de plantas**. Viçosa: Grupo de Estudos Avançados em Fitopatologia, 2013. cap. 3, p. 47-64.

PÁDUA, P. F.; PEREIRA, R.; ABREU, Â. F. B.; RAMALHO, M. A. P.; SOUZA, E. A. Efficiency of a recurrent selection method to achieve resistance of common beans to *Pseudocercospora griseola* in a short period. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 45, 2021. DOI: [https://doi.org/10.1590/1413-7054202145013421].

PLAISTED, R. L.; PETERSON, L. C. A technique for evaluating the ability of selections to yield consistently in different locations and seasons. **American Potato Journal**, New York, v. 36, n. 2, p. 381-385, 1959.

PEREIRA, H. S.; MELO, L. C.; FARIA, L. C.; DEL PELOSO, M. J.; COSTA, J. G. C.; RAVA, C. A. Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de feijoeiro-comum com grãos tipo carioca na Região Central do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 44, n. 1, p. 29-37, 2009. DOI: [https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000100005].

PEREIRA, H. S.; COSTA, A. F.; MELO, L. C.; DEL PELOSO, M. J.; FARIA, L. C.; WENDLAND, A. Interaction between common bean genotypes and environments in Pernambuco State: stability, environmental stratification and decomposition of interaction. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, p. 2603-2614, 2013. DOI: [https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n6p2603]

PEREIRA, H. S.; MELO, L. C.; DI PRADO, P. R. C.; MELO, P. G. S.; FARIA, L. C.; SOUZA, T. L. P. O.; AGUIAR, M. S.; CABRERA DIAZ, J. L.; ALMEIDA, V. M.; COSTA, A. F.; MELO, C. L. P.; CARVALHO, H. W. L.; PEREIRA FIALHO, I. A. **Cultivares de feijão com maiores teores de ferro, zinco e proteína nos grãos**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2018. 8 p. (Comunicado Técnico, 243).

ROCHA, P. A. F. **Adaptabilidade e estabilidade de linhagens de feijoeiro-comum em diferentes ambientes**. 2022. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2022.

SANTOS, P. R. dos et al. Análise baseada em GGE Biplot e REML/BLUP da estabilidade de produção e adaptabilidade para feijoeiro comum em ensaios multiambientais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 2, e5657, 2019.

SANTOS, R. M. **Modelos multivariados na seleção de genótipos de feijão-comum em múltiplos ambientes**. 2023. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2023.

SILVA, G. A. P. **Estabilidade fenotípica do feijoeiro em ensaios regionais de produtividade**. 2010. 93 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico, Campinas, 2010.

SILVA JÚNIOR, A. C.; SILVA, M. J.; COSTA, W. G.; SOUSA, I. C.; CRUZ, C. D.; NASCIMENTO, M.; SOARES, P. C. S. Multi-information analysis for recommendation of flooded-irrigated rice for adaptability and phenotypic stability. **Agronomy Science and Biotechnology**, Botucatu, v. 8, p. 1-15, 2021. DOI: [https://doi.org/10.33158/ASB.r145.v8.2022].

SOUZA, A. G.; DAHER, R. F.; SANTANA, J. G. S.; AMBRÓSIO, M.; NASCIMENTO, M. R.; VIDAL, A. K. F.; SOUZA FILHO, B. F.; MELO, L.; GRAVINA, G. A.; SANTOS, R. M.; LEITE, C. L.; FARIAS, J. E. C.; STIDA, W. F.; ROCHA, R. S. Adaptabilidade e estabilidade dos genótipos de feijão preto para o Rio de Janeiro, por análise de biplot GGE. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 23, n. 2, e43972323, 2023. DOI: [https://doi.org/10.1590/1984-70332023v23n2a15].

TERESSA, T.; SEMAHEGN, Z.; BEJIGA, T. Multi environments and genetic-environmental interaction (G×E) in plant breeding and its challenges: a review article. **International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences**, v. 7, n. 4, p. 11-18, 2021. DOI: [https://doi.org/10.20431/2454-6224.0704002].

TORGA, P. P.; MELO, P. G. S.; PEREIRA, H. S.; FARIA, L. C.; DEL PELOSO, M. J.; COSTA, J. G. C. Adaptability and stability of common bean cultivars in Central Brazil. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 43, n. 2, p. 216-222, 2013.

TORGA, P. P.; MELO, P. G. S.; PEREIRA, H. S.; FARIA, L. C.; DEL PELOSO, M. J.; MELO, L. C. Interaction of common beans cultivars of the black group with years, locations and sowing seasons. **Euphytica**, Dordrecht, v. 189, p. 239-248, 2013. DOI: [https://doi.org/10.1007/s10681-012-0793-y].

TSUTSUMI, C. Y.; BULEGON, L. G.; PIANO, J. T. Melhoramento genético do feijoeiro: avanços, perspectivas e novos estudos, no âmbito nacional. **Nativa**, Sinop, v. 3, n. 3, p. 217-223, 2015. DOI: [https://doi.org/10.14583/2318-7670.v03n03a12].

VASCONCELOS, M. W. et al. The biology of legumes and their agronomic, economic, and social impact. In: HASANUZZAMAN, M.; ARAÚJO, S.; GILL, S. **The Plant Family Fabaceae**. Singapore: Springer, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-4752-2_1].