

MICHEL HENRIQUES DE SOUZA

**POTENCIAL GENÉTICO DE CULTIVARES DE FEIJÃO PRETO E CARIOCA
RECOMENDADAS NO BRASIL**

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*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S729p
2019
Souza, Michel Henriques de, 1992-
Potencial genético de cultivares de feijão preto e carioca
recomendadas no Brasil / Michel Henriques de Souza. – Viçosa,
MG, 2019.
viii, 47 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: José Eustáquio de Souza Carneiro.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 40-47.

1. Feijão - Melhoramento genético. 2. Análise de variância.
3. Ideótipos. 4. Genética. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Fitotecnia. Programa de Pós-Graduação em
Genética e Melhoramento. II. Título.

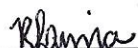
CDD 22. ed. 635.6522

MICHEL HENRIQUES DE SOUZA

**POTENCIAL GENÉTICO DE CULTIVARES DE FEIJÃO PRETO E CARIOCA
RECOMENDADAS NO BRASIL**

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: 21 de fevereiro de 2019.



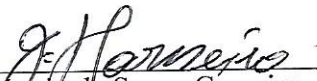
Rodrigo Oliveira de Lima



Newton Deniz Piovesan



Pedro Crescêncio Souza Carneiro



José Eustáquio de Souza Carneiro

(Orientador)

*Ao meu pai Sebastião.
A minha mãe Maria.
Ao meu irmão Mateus.
A todos os meus amigos.*

DEDICO

ii

“Toda honra e toda glória sejam dadas a Deus.”

“E tudo o que pedirdes em oração, tendo fé, recebereis.”

Mateus 21:22

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, acima de tudo, agradeço a Deus. Sem ele, nada é possível.

Aos meus pais, por mesmo com poucas mesmo diante a todas dificuldades, sempre fizeram todo o possível para que eu possa estudar.

Ao meu irmão Mateus pelo apoio de sempre, em todos os momentos.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento (PPGGM) e ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pela oportunidade.

Ao meu orientador, professor José Eustáquio e ao meu coorientador, professor Pedro, pelos ensinamentos, conversas, conselhos e todo apoio ao longo desta caminhada.

Aos professores Felipe e Rodrigo, pelos incentivos, conselhos e apoio. Aos demais professores da Pós-Graduação em Genética e Melhoramento e Pós-Graduação em Fitotecnia pelos ensinamentos repassados.

Aos funcionários do Feijão, do Vale da Agronomia e da Unidade Experimental de Coimbra, Pereira, Gilberto, Fonseca, Nilson, Potoca, Sebastião, Carlinhos, Beto e Douglas pelos ensinamentos no dia a dia.

À turma do Programa Feijão: Adriel, Amanda, Ana Laura, Andréia, Anísio, Deyson, Fabíola, Felipe, Gabriela, Igor, Isabela, João Victor, José Dique, Jussara, Laércio, Laiza, Lenin, Lohayne, Micheli, Pedro Maciel, Pedro César, Rafael, Rayane, Skarlet, Tatiane, Tiago, Vinícius L., Vinícius Q., pelos momentos de trabalho, conversas e descontração.

Aos amigos da pós-graduação Alê, Arthur, Bruninho, Fernanda, Guilherme, Helô, Iana, Isabella, Jeniffer, Leo, Maikon, Martha, Michelle, Murilo, Ramon, Zina e demais pelos momentos de estudo e lazer, além de todo apoio fornecido.

Aos meus amigos de longa data Bernardo, Camila, Dani, Daniel, Fer Teles, Hugo, Kamila, Michelle, Tristão e Renato pelo companheirismo e amizade de sempre.

Às minhas amigas Lorena e Natália, pelos momentos de culinária, caldos, caminhadas e encontros, sempre com muitas risadas, conversas e companheirismo.

À minha irmã de vida Lorena, que mesmo à distância, sempre esteve perto, seja dando conselhos ou puxões de orelha.

Ao meu amigo João Romero, pelos momentos de total disposição, sendo de grande ajuda na confecção deste trabalho.

A todos amigos e familiares que de alguma forma me ajudaram,

MUITO OBRIGADO!!

BIOGRAFIA

MICHEL HENRIQUES DE SOUZA, filho de Sebastião Fernandes de Souza e Maria do Perpétuo Socorro Henriques de Souza, nasceu em Presidente Bernardes, Minas Gerais, Brasil, em 17 de dezembro de 1992.

Concluiu o Ensino Fundamental, em 2007, na Escola Estadual Governador Clóvis Salgado e o Ensino Médio em 2010 na Escola Estadual Padre Vicente Carvalho, ambas em Presidente Bernardes, Minas Gerais.

Em janeiro de 2017, obteve o título de Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Em março de 2017, iniciou o curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, na Universidade Federal de Viçosa e submeteu-se a defesa em fevereiro de 2019.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Aspectos gerais e socioeconômicos	4
2.2. Melhoramento genético do feijoeiro no Brasil	5
2.3. Interação Genótipos x Ambientes no melhoramento genético	8
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1. Material genético.....	13
3.2. Experimentos e caracteres avaliados.....	14
3.3. Análises individuais de variância.....	16
3.4. Análise conjunta de variância	17
3.4.1. Classificação ambiental	17
3.4.2. Modelos de norma de reação	18
3.4.3. Significância dos efeitos genéticos	20
3.4.4. Acurácia de predição	20
3.4.5. Adaptabilidade e estabilidade das cultivares	20
3.5. Softwares utilizados	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4.1. Análises individuais de variância.....	22
4.2. Análise conjunta de variância	25
4.2.1. Classificação ambiental	25
4.2.2. Modelos testados.....	26
4.2.3. Acurácia de predição	27
4.2.4. Adaptabilidade e estabilidade das cultivares	29
5. CONCLUSÕES	39
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

RESUMO

SOUZA, Michel Henriques de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Potencial genético de cultivares de feijão preto e carioca recomendadas no Brasil.** Orientador: José Eustáquio de Souza Carneiro.

Nos últimos 60 anos, mais de 100 cultivares de feijão foram recomendadas no Brasil. Como se trata de linhagens que sobressaíram durante as avaliações realizadas, percebe-se que trata-se de um germoplasma precioso para uso em cruzamentos visando o desenvolvimento de novas cultivares. A avaliação de linhagens para a recomendação de uma nova cultivar normalmente é feita de forma regionalizada, o que dificulta a comparação dessas cultivares quanto ao seu potencial de produção. O objetivo com este trabalho foi avaliar a adaptabilidade e estabilidade de cultivares de feijão preto e carioca recomendadas no Brasil nos últimos 60 anos, baseado em modelos de norma de reação via metodologia de modelos mistos, visando a seleção de genitores para uso nos programas de melhoramento. Foram avaliadas, em um único experimento, conduzido em 13 ambientes (diferentes locais, safras e anos), 49 cultivares de grãos pretos e 56 do tipo carioca, em que foi verificado desbalanceamento genético e estatístico. As características avaliadas foram: produtividade de grãos, arquitetura de plantas, aspecto comercial de grãos e severidade de antracnose, ferrugem e mancha angular. Os dados foram submetidos a análises individuais e conjunta de variância, com base em modelos de norma de reação via metodologia de modelos mistos. Foi realizada a classificação ambiental, avaliação dos modelos e análises de adaptabilidade e estabilidade. As cultivares com desempenho superior foram então selecionadas para plotagem das curvas de norma de reação. A utilização de modelos de norma de reação mostrou-se eficaz na avaliação da adaptabilidade e estabilidade genotípica de cultivares de feijão. Verificou-se a divergência quanto a instituição de origem das cultivares selecionadas, uma vez que as estas foram recomendadas por quatro instituições diferentes. As cultivares lançadas mais recentemente mostraram-se superiores em relação as mais antigas quanto a produtividade de grãos, e apresentaram arquitetura ereta de planta e bom aspecto comercial de grãos. Isso evidencia a contribuição dos programas de melhoramento de feijão do Brasil. Vinte e cinco cultivares foram selecionadas como potenciais genitores para uso no melhoramento, pois além de apresentarem características agronômicas superiores, são de origens diferentes.

ABSTRACT

SOUZA, Michel Henriques de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Genetic potential of black and carioca bean cultivars recommended in Brazil.** Advisor: José Eustáquio de Souza Carneiro.

In the last 60 years, more than 100 cultivars of beans were recommended in Brazil. As it is a question of the lines that stood out during the evaluations carried out, it is perceived that this is a precious germplasm for use in crosses aiming the development of new cultivars. The evaluation of lineages for the recommendation of a new cultivar is usually done regionally, which makes it difficult to compare these cultivars with respect to their production potential. The objective of this work was to evaluate the adaptability and stability of black and carioca bean cultivars recommended in Brazil in the last 60 years, based on models of reaction norm through mixed models' methodology, aiming at the selection of parents for use in breeding programs. In a single experiment, 49 cultivars of black bean and 56 of the carioca bean were evaluated in 13 environments (different locations, harvests and years), in which genetic and statistical imbalance were verified. The evaluated characteristics were: grain yield, plant architecture, grain appearance and severity of anthracnose, rust and angular spot. The data were submitted to individual and joint analysis of variance, based on models of reaction norm through mixed models' methodology. Environmental classification, evaluation of models and analysis of adaptability and stability were performed. The cultivars with superior performance were then selected for plotting the reaction standard curves. The use of reaction norm models proved to be effective in evaluating the adaptability and genotypic stability of bean cultivars. The divergence regarding the origin institution of the selected cultivars was verified, since these were recommended by four different institutions. The most recently introduced cultivars were superior in relation to the oldest ones in terms of grain yield and showed upright plant architecture and good grain commercial appearance. This shows the contribution of bean breeding programs in Brazil. Twenty-five cultivars were selected as potential parents for use in breeding, since besides presenting superior agronomic characteristics, they are of different origins.

1. INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa que se destaca no cenário agrícola do Brasil. Seu cultivo se estende do Norte ao Sul do país, em até três safras no ano, por pequenos agricultores de agricultura familiar até grandes produtores do agronegócio brasileiro (CARNEIRO et al., 2015; PEREIRA et al., 2009).

Além de sua importância econômica, o feijão também se destaca pela sua grande importância social. O grão é apontado como fonte de proteínas mais acessível, principalmente em países menos desenvolvidos. No Brasil, junto com o arroz, compõe a base da dieta alimentar, onde aproximadamente 70% da população consome feijão diariamente, com uma média de 17 kg per capita por ano (FEIJÃO, 2018; SILVA e WANDER, 2013).

Morfologicamente, o grão de feijão caracteriza-se por apresentar grande diversidade quanto suas características visuais, especialmente se tratando da cor do tegumento, que é classificado em tipos: carioca, preto e cores. Entre estes, destacam-se o grão tipo carioca, que representa a grande maioria da produção nacional e cultivado em todas as regiões do país, e o grão tipo preto, cultivado principalmente na região Sul. Essas duas classes correspondem a cerca de 90% da produção total do país (CARNEIRO et al., 2015; SILVA e WANDER, 2013).

Ao longo das décadas, várias cultivares de feijoeiro com fenótipos favoráveis em relação a alguns caracteres de importância, como maior resistência a pragas e doenças, arquitetura mais ereta das plantas, boa qualidade de grãos e, principalmente, maior produtividade de grãos de diferentes tipos foram recomendadas no Brasil (MELO et al., 2007). Várias instituições trabalham no melhoramento genético do feijoeiro no Brasil, sendo a maioria do setor público, devido a preferência das empresas por culturas com maior retorno financeiro com a venda de sementes. Cada instituição conduz seu programa de melhoramento de acordo com diretrizes preestabelecidas, levando em consideração a região de recomendação, o tipo de agricultor e as exigências do mercado consumidor. No Estado de Minas Gerais, as cultivares recomendadas são fruto do Convênio “Melhoramento de Feijoeiro para o Estado de Minas Gerais”, firmado entre as instituições Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) e Universidades Federais de Lavras (UFLA) e Viçosa (UFV).

As cultivares de feijoeiro recomendadas pelos programas de melhoramento no Brasil são também importante fonte de diferentes genes para serem utilizadas como genitores para o desenvolvimento de novas cultivares melhoradas, dando continuidade aos programas de melhoramento genético da cultura. Os potenciais genitores devem ser selecionados com base em seus valores genéticos e de forma que sejam complementares em relação aos genes de interesse. Desta forma, informações sobre a adaptabilidade e estabilidade destas cultivares são úteis na escolha das mais divergentes, uma vez que a interação genótipos x ambientes é resultado da expressão diferencial dos genes envolvidos no controle genético dos caracteres em análise (CARGNIN et al., 2006). Para isso, estas cultivares recomendadas devem ser avaliadas em conjunto em experimentos com repetição e em diferentes ambientes (anos, locais e safras). Entretanto, a inclusão a cada ano de novas cultivares aos ensaios causa o desbalanceamento destes experimentos, uma vez que ocorre números diferentes de cultivares nos experimentos, necessitando de metodologias de avaliação mais específicas.

A metodologia baseada na análise de máxima verossimilhança restrita associada a estimativa do melhor preditor linear não-viesado (REML/BLUP - Restricted Maximum Likelihood/Best Linear Unbiased Predictor) é uma das técnicas indicadas para análises de experimentos desbalanceados. Ela é baseada na maximização da função de verossimilhança das observações, considerando os efeitos fixos e aleatórios de forma independente, com a exigência de normalidade dos erros (PATTERSON e THOMPSON, 1971).

De acordo com Searle (1987; 1992) e Marcelino e Iemma (2000), a análise de máxima verossimilhança restrita associada a estimativa do melhor preditor linear não-viesado (REML/BLUP) fornece estimativas de parâmetros não viesadas em comparação com os métodos tradicionais de ANOVA, dadas as propriedades de seus estimadores. Esta metodologia é baseada na maximização da função de verossimilhança, considerando os efeitos fixos e aleatórios de forma independente, com exigência de normalidade dos erros (PATTERSON e THOMPSON, 1971).

Segundo RESENDE (2007), a metodologia REML/BLUP também apresenta as vantagens: consideram os efeitos genotípicos como aleatórios e, portanto, fornecem estimativas de estabilidade e adaptabilidade genotípicas e não fenotípicas; permite lidar com desbalanceamentos genéticos e estatísticos de forma mais apropriada; delineamentos não ortogonais; heterogeneidade de variâncias; permite considerar erros correlacionados dentro de ambientes; fornece valores genéticos já descontados do efeito ambiental; pode ser aplicado com qualquer número de ambientes; não depende da estimação de outros parâmetros, tais

como coeficientes de regressão, gerando resultados na própria grandeza ou escala do caráter avaliado.

No contexto de modelos mistos, foi introduzido o conceito de norma de reação, definido como a relação específica entre o genótipo, o fenótipo e os gradientes ambientais (WOLTERECK, 1909; DEWITT e SCHEINER, 2004; EEUWIJK et al., 2016). Esse procedimento permite descrever o comportamento de genótipos individuais ao longo de uma série de ambientes, o que propicia a avaliação da interação GxA e o estudo da adaptabilidade e estabilidade dos genótipos em ensaios multiambientes (EEUWIJK et al., 2016; SMITH et al., 2005; SMITH et al., 2001).

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a adaptabilidade e estabilidade de cultivares de feijão preto e carioca recomendadas no Brasil nos últimos 60 anos, baseado em modelos de norma de reação via metodologia de modelos mistos, visando a seleção de genitores para uso nos programas de melhoramento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aspectos gerais e socioeconômicos

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa, pertencente à família Fabaceae, destacada como uma notável cultura agrícola para o Brasil. Seu cultivo se estende de Norte a Sul do país, em até três safras por ano: safra das águas (plantio de outubro a dezembro), safra da seca (plantio de fevereiro a abril) e safra de inverno (plantio de junho a agosto). Esta última se destaca em lavouras com maior emprego de tecnologia, praticada principalmente em áreas desocupadas na entressafra, por grandes produtores, na região do cerrado brasileiro. Além da ampla adaptação edafoclimática, vale destacar o sistema de cultivo do feijoeiro, que pode ser realizado em monocultivo ou em consórcio com outras culturas. Acrescenta ainda o fato do feijão ser cultivado por pequenos agricultores de agricultura familiar até grandes produtores do agronegócio (CARNEIRO et al., 2015; PEREIRA et al., 2009).

Dada a importância econômica, vale ressaltar sua grande importância social. O feijão é apontado como uma fonte de proteínas notável para o consumo, principalmente em países menos desenvolvidos. No Brasil, junto com o arroz, compõe a base da dieta alimentar, onde cerca de 70% da população consome feijão diariamente, com uma média de 17 kg per capita por ano (BRASIL, 2018; SILVA e WANDER, 2013).

Morfologicamente, o grão de feijão caracteriza-se por apresentar grande diversidade quanto as suas características visuais, especialmente em se tratando da cor do tegumento. Assim, uma das classificações na cultura do feijoeiro se refere ao tipo de grão. Entre eles, destacam-se o grão tipo carioca, que representa a grande maioria da produção nacional, sendo cultivado em todas as regiões do país, e o grão tipo preto, cultivado principalmente na região Sul. Esses dois tipos correspondem a cerca de 90% da produção total do país. Outros tipos de grãos são classificados na classe cores, presente em cultivos regionalizados, como é o caso do feijão vermelho, cultivado na Zona da Mata do Estado de Minas Gerais (CARNEIRO et al., 2015; SILVA e WANDER, 2013).

Em termos de produção, na safra 2016/17, conforme a CONAB (2018), a produção brasileira de feijão comum foi de cerca de 3,4 milhões de toneladas de feijão, em uma área de 3,18 milhões de hectares, correspondendo à uma produtividade média de 1.069 kg ha⁻¹. Os principais Estados produtores foram Paraná (710 mil toneladas), Minas Gerais (535 mil toneladas) e Goiás (343 mil toneladas) (CONAB, 2018). Apesar de ser uma espécie

amplamente cultivada, ainda assim o Brasil esporadicamente importa uma pequena quantidade de feijão. De acordo com a Conab (2019), o Brasil importou aproximadamente 112 mil toneladas de feijão comum no ano de 2018, principalmente de países como Argentina e Bolívia.

2.2. Melhoramento genético do feijoeiro no Brasil

Para atender os agricultores quanto às suas preferências de características das cultivares de feijão, várias cultivares foram recomendadas no Brasil desde o início dos trabalhos com o melhoramento genético. Os programas de melhoramento do país iniciaram suas atividades na década de 1930, principalmente com a Escola Superior de Agricultura e Veterinária de Viçosa (ESAV) e o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Os primeiros testes com cultivares foram realizados nos Estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul em meados da década de 1950. Foram utilizados materiais locais e introduções de outros países, entre eles Estados Unidos, Costa Rica, México, Venezuela e Guatemala (EPAMIG, 2017; RAMALHO et al., 2012).

A década de 1970 foi marcada por importantes eventos no melhoramento do feijoeiro, entre eles: criação da Embrapa, com suas unidades, entre elas a Embrapa Arroz e Feijão; criação das Empresas Estaduais de Pesquisa Agropecuária; estabelecimento do Programa Feijão do Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); início dos trabalhos de melhoramento em outras universidades além das Universidades Federais de Lavras e Viçosa (RAMALHO et al., 2004).

Dentre as primeiras cultivares de feijão recomendadas no Brasil, vale destacar a cultivar Rico 23, de grãos pretos, introduzida da Costa Rica e recomendada pela Universidade Federal de Viçosa inicialmente para Minas Gerais em 1959 e, anos mais tarde, para vários outros estados (VIEIRA et al., 2005). Outra importante cultivar de grãos pretos foi a Ouro Negro, recomendada em 1991, também para Minas Gerais, persistindo até hoje na preferência dos produtores e consumidores de feijão preto, pela sua excelente qualidade de grão (PAULA JÚNIOR et al., 2010). Com relação ao feijão do grupo carioca, a primeira cultivar com este tipo de grão, denominada Carioca (vulgarmente conhecida como Carioquinha), foi recomendada em 1970 pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Essa cultivar garantiu a estabilização do mercado brasileiro nos anos seguintes com grande aceitação dos produtores

e consumidores, devido à sua ampla adaptação e aspectos relacionados à qualidade culinária dos grãos (CHIORATO et al., 2010).

A partir da criação Embrapa Arroz e Feijão, a coordenação das pesquisas com feijão no país ficou a cargo desta instituição. Entre 1976 e 1982, 198 linhagens de feijão foram introduzidas no Brasil, onde 12 foram recomendadas como cultivares. Em 1982 foram criadas as Comissões Técnicas Regionais, com o objetivo de auxiliar a avaliação e recomendação de cultivares de feijão. Com isso, de 1982 a 1995 foram recomendadas 68 cultivares. Em 1997 foi estabelecida a Lei de Proteção de Cultivares, que instituiu o Registro Nacional de Cultivares (RNC) como única lista oficial de registro de cultivares. O RNC tinha entre suas normas o ensaio Valor de Cultivo e Uso (VCU), adotado como base para a recomendação de cultivares até os dias atuais (EPAMIG, 2017; BRASIL, 1997; Formulários para Registro de Cultivares - MAPA, 2019; Proteção de Cultivares - MAPA, 2019).

Assim, as instituições de pesquisas responsáveis pelo melhoramento genético do feijoeiro, instaladas nas principais regiões produtoras, desenvolveram, no decorrer desses anos, cultivares com características de resistência a pragas e doenças, arquitetura ereta de plantas, boa qualidade de grãos e, principalmente, produtividade de grãos (MELO et al., 2007). Várias instituições trabalham no melhoramento genético do feijoeiro no Brasil, sendo a maioria do setor público, conforme apresentado a seguir:

- EMBRAPA/CNPAF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Centro Nacional de Pesquisa em Arroz e Feijão, Goiânia (GO);
- IAC: Instituto Agronômico do Estado de São Paulo, Campinas (SP);
- IAPAR: Instituto Agronômico do Paraná, Londrina (PR);
- IPA: Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária, Recife (PE);
- UFV: Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (MG);
- UFLA: Universidade Federal de Lavras, Lavras (MG);
- UFU: Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia (MG);
- UFSM: Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria (RS);
- EPAGRI: Empresa de Pesquisa Agropecuária de Santa Catarina, Chapecó (SC);
- EPAMIG: Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, Viçosa (MG);
- INCAPER: Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão rural, Vitória (ES);
- PESAGRO: Instituto de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro, Campos dos Goytacazes (RJ).

Ao longo dos anos, a produtividade média de feijão apresentou um aumento expressivo, saltando de 500 kg ha⁻¹ na década de 1980 para mais 1.000 kg ha⁻¹ nas safras atuais (CONAB, 2018). Esse aumento se deve às técnicas mais aperfeiçoadas de cultivo, como o plantio direto, adubação e irrigação, e ao melhoramento genético, através do desenvolvimento de novas cultivares, resistentes aos diversos patógenos, com altos níveis de produtividade e características de interesse do produtor e do consumidor. Segundo Borém e Miranda (2009), o principal objetivo do melhoramento do feijoeiro, e das demais culturas, é o desenvolvimento de cultivares que substituam com vantagem as disponíveis no mercado para os agricultores.

Ramalho et al. (2012), avaliando o ganho médio anual com o melhoramento genético do feijoeiro, relataram valores de 3,80% na produtividade de grãos no período de 1975 a 2011. Abreu et al. (1994), Chiorato et al. (2010) e Matos et al. (2007) expuseram ganhos anuais nas últimas décadas de 1,9%, 1,07% e 4,36%, respectivamente. Tais resultados destes autores indicam a importância do melhoramento genético para a cultura.

Cada instituição de pesquisa conduz seu programa de melhoramento de feijoeiro de acordo com diretrizes preestabelecidas, levando em consideração a região de recomendação de sua cultivar, o tipo de agricultor e as exigências do mercado consumidor. As melhores linhagens são então inseridas ao processo de recomendação. No Estado de Minas Gerais, as cultivares recomendadas são fruto do Convênio “Melhoramento de Feijoeiro para o Estado de Minas Gerais”, firmado entre as instituições de pesquisa EMBRAPA, EPAMIG, UFLA e UFV. Estas instituições desenvolvem linhagens dos grupos comerciais carioca, preto e cores para o Estado.

Nas fases finais de um programa de melhoramento, para que as linhagens promissoras sejam recomendadas para uma região, é necessário que elas sejam avaliadas em um grande número de ambientes, levando em conta safra, ano e local (PEREIRA et al., 2009). Estes experimentos, denominados Ensaio de Valor de Cultivo e Uso (VCU), são exigidos pelo Serviço Nacional de Proteção de Cultivares (Formulários Para Registros de Cultivares - MAPA, 2019). Os VCUs têm como finalidade estudar o comportamento e o valor agrônomo dos genótipos (produtividade, resistência a pragas e doenças, precocidade, qualidade de grãos e outras características).

Desta forma, os programas de melhoramento de feijoeiro buscam o desenvolvimento de cultivares com maior aceitação para o consumidor final, seguindo padrões relacionados ao aspecto do grão, uma vez que os aspectos visuais são fatores importantes na comercialização

do feijão. Além disso, características como resistência à pragas e doenças e arquitetura ereta de planta são também importantes na recomendação de cultivares. Contudo, a principal característica explorada na cultura é a produtividade de grãos, o que reflete na produção final da lavoura e, conseqüentemente, na lucratividade do agricultor (CARNEIRO et al., 2015; RAMALHO et al., 2004).

Apesar do objetivo principal dos programas de melhoramento de feijoeiro ser a recomendação de cultivares aos agricultores, esses materiais são também importante fonte de diferentes alelos. Assim, as cultivares tem potencial para serem utilizadas como genitores para o desenvolvimento de novos materiais, dando continuidade aos programas de melhoramento genético da cultura. Os potenciais genitores devem ser selecionados com base em seus valores genéticos e de forma que sejam complementares em relação aos genes de interesse. Informações sobre a adaptabilidade e estabilidade destas cultivares são úteis na escolha das mais divergentes, uma vez que a interação genótipos x ambientes é resultado da expressão diferencial dos genes envolvidos no controle genéticos dos caracteres em análise (CARGNIN et al., 2006). Para isto, é importante que as cultivares recomendadas sejam avaliadas em conjunto em experimentos com repetição e no maior número de ambientes possível (anos, locais e safras).

2.3. Interação Genótipos x Ambientes no melhoramento genético

Os ensaios realizados com cultivares em diferentes regiões permitem verificar a presença da interação genótipos x ambientes (GxA) e assim, minimizar seus efeitos na expressão fenotípica dos genótipos. Segundo Cruz e Castoldi (1991), a interação GxA é definida como a resposta diferencial dos genótipos frente às variações ambientais. As explicações para ocorrência de interação podem ser atribuídas a fatores fisiológicos e bioquímicos inerente a cada genótipo cultivado, e/ou a variações ambientais induzindo respostas diferenciais ao mesmo conjunto gênico (COCKERHAM, 1963). Além disso, Allard e Bradshaw (1964) afirmam que existem dois tipos de variações ambientais que influenciam na interação: previsíveis e imprevisíveis. As previsíveis são aquelas que se pode prever o comportamento, ao contrário das imprevisíveis. Pode citar, por exemplo, o fotoperíodo como fator previsível e a precipitação como fator imprevisível, sendo ambas relacionadas ao clima.

A interação GxA pode ser dividida em duas partes, denominadas de parte simples e parte complexa. A primeira é causada pela diferença de variabilidade entre genótipos nos

ambientes e a segunda é determinada pela falta de correlação entre os genótipos nesses ambientes. A interação de natureza complexa representa um problema para os melhoristas, pois o comportamento dos genótipos em diferentes ambientes não ocorre da mesma forma, uma vez que uma melhor cultivar em um ambiente pode não ser em outro. Essa falta de correlação acarreta em dificuldade na seleção dos materiais superiores (CRUZ e CASTOLDI, 1991; CRUZ et al., 2012).

Estudos da interação GxA têm ganhado destaque nas últimas décadas, devido a esta significar um dos maiores desafios ao melhoramento genético de plantas, ao afetar a seleção e recomendação de cultivares. A presença da interação significativa dificulta o trabalho dos melhoristas, pois resulta na variação do comportamento dos genótipos sobre os diferentes ambientes. (CARGNIN, A.; SOUZA, M. A.; FOGAÇA, C. M., 2008). Quando não há interação significativa, espera-se que um conjunto de genótipos apresente variação semelhante ao longo de uma série de ambientes, de forma que um único ensaio, conduzido num só local, seria suficiente para conhecer o comportamento daqueles materiais. Cabe ao melhorista avaliar a magnitude e significância da interação, com o objetivo de contornar os problemas proporcionados por ela. A estratificação ambiental e a avaliação da adaptabilidade e estabilidade das cultivares são alguns dos métodos utilizados na tentativa de solucionar esses problemas (CRUZ e CASTOLDI, 1991).

Quando a interação é significativa, considerando muitos ambientes, pode se optar pela estratificação ambiental. Esta metodologia é baseada na identificação de ambientes com padrões de similaridade de resposta das cultivares e formação de grupos de ambientes onde a interação seja não significativa ou significativa de natureza simples. Isto permite descartar ambientes similares e reduzir os custos da avaliação multiambiental (CRUZ et al., 2012).

Na literatura são relatados alguns trabalhos empregando a estratificação ambiental no melhoramento de plantas, como Bertoldo et al. (2009), Pereira et al. (2010), Carbonell e Pompeu (1997) e Oliveira et al. (2005). Algumas metodologias de estudos de estratificação ambiental foram propostas, sendo uma das mais tradicionais a metodologia de agrupamento de ambientes com base no algoritmo de Lin (1982). Este método consiste em estimar a soma de quadrados para a interação entre genótipos e pares de ambientes e, posteriormente, formar subgrupos de ambientes cuja interação seja não significativa. Ainda, sendo a interação GxA significativa, pode se utilizar o método de Cruz e Castoldi (1991), que agrupa ambientes cuja interação seja causada apenas pela parte simples. Já Murakami e Cruz (2004) propuseram um

método baseado na técnica multivariada de análise de fatores, que reúne a estratificação ambiental e a análise de estabilidade.

Além dos fatores ambientais, os fatores relacionados ao genótipo também influenciam na interação GxA. Uma forma de tentar contornar este problema é avaliar o comportamento de cada genótipo em uma série de ambientes. Para atingir este objetivo, estudos de adaptabilidade e estabilidade são utilizados para discernir o comportamento de cada genótipo (CRUZ et al., 2012). De acordo com Cruz et al. (2012), a adaptabilidade é definida como a capacidade dos genótipos de aproveitarem vantajosamente o estímulo do ambiente, enquanto a estabilidade relaciona-se à previsibilidade de comportamento dos genótipos em função desse mesmo estímulo ambiental. O objetivo final dos melhoristas é identificar aqueles genótipos de adaptabilidade ampla ou específica e, ainda, os de comportamento previsível.

Diversos métodos de adaptabilidade e estabilidade baseados em diferentes princípios foram propostos ao longo dos anos. Existem métodos baseados em análise de variância como Plaisted e Peterson (1959) e Wricke (1965), baseados em regressão, como Finlay e Wilkinson (1963) e Eberhart e Russell (1966), os métodos baseados em regressão bissegmentada, como Verma, Chahal e Murty (1978) e Cruz, Torres e Vencovsky (1989) e métodos não paramétricos (LIN e BINNS, 1988). Além disso, há também métodos mais recentes como GGE Biplot (YAN et al., 2000). Entretanto, essas metodologias necessitam de experimentos sem desbalanceamento estatístico ou genético para resultados mais coerentes.

O desbalanceamento estatístico ocorre quando se tem genótipos com número diferente de repetições ao longo dos experimentos. Já o desbalanceamento genético refere-se à alteração do número de materiais avaliados ao longo dos experimentos, sendo frequentemente observado em ensaios de comparação de cultivares, uma vez que os programas estão continuamente desenvolvendo novas cultivares.

Assim, análises de adaptabilidade e estabilidade utilizando a abordagem de modelos mistos constituem uma alternativa em experimentos desbalanceados, uma vez que tem a capacidade de contornar estes impasses. Estas análises são compreendidas em três conceitos da estatística: métodos dos momentos, função de verossimilhança e funções quadráticas (MARCELINO e IEMMA, 2000). O primeiro envolve procedimentos como a ANOVA (FISCHER, 1918), no segundo têm-se o método da máxima verossimilhança (HARTLEY e RAO, 1967) e o método da máxima verossimilhança restrita (PATTERSON e THOMPSON, 1971) e dentro do terceiro destacam-se os métodos dos estimadores quadráticos de norma mínima - MINQUE e de variância mínima – MIVQUE (RAO, 1971a, 1971b).

Para Eeuwijk et al. (2016), estes modelos consideram a heterogeneidade de variações genéticas e de correlações entre ambientes, de acordo com as características ambientais e espaciais dos experimentos utilizados. Na literatura são encontrados trabalhos em culturas como arroz, feijão, milho-pipoca e soja utilizando modelos mistos no melhoramento de plantas (CARBONELL et al., 2007; FREITAS et al., 2014; NETO et al., 2013; PINHEIRO et al., 2013; RIBEIRO COSTA et al., 2005).

A metodologia baseada na análise de máxima verossimilhança restrita associada a estimativa do melhor preditor linear não-viesado (REML/BLUP - Restricted Maximum Likelihood/Best Linear Unbiased Predictor) é uma das técnicas indicadas para análises de experimentos desbalanceados. Ela é baseada na maximização da função de verossimilhança das observações, considerando os efeitos fixos e aleatórios de forma independente, com a exigência de normalidade dos erros (PATTERSON e THOMPSON, 1971). De acordo com Searle (1987; 1992), Marcelino e Iemma (2000) e outros autores, a metodologia REML/BLUP fornece estimativas mais precisas e não viesadas em comparação com os demais métodos, dadas as propriedades de seus estimadores. Para tal análise, diferentes algoritmos são utilizados para maximizar a função REML, sendo os mais comuns: Expectation Maximization de Dempster et al. (1977); Derivative Free de Graser et al. (1987); Average Information de Gilmour et al. (2015) (RESENDE, 2000, 2007).

Ademais, a metodologia REML/BLUP apresenta outras vantagens: considera os efeitos genotípicos como aleatórios e, portanto, fornece estimativas de estabilidade e adaptabilidade genotípicas e não fenotípicas; permite lidar com desbalanceamentos, delineamentos não ortogonais e heterogeneidade de variâncias; considera erros correlacionados dentro de locais; fornece valores genéticos já descontados do efeito ambiental; é aplicável a qualquer número de ambientes; não depende da estimação de outros parâmetros tais como coeficientes de regressão; e gera resultados na própria grandeza ou escala do caráter avaliado (RESENDE, 2007).

Outro dado que contribui no uso da metodologia REML/BLUP são as informações de parentesco entre os indivíduos avaliados, seja via pedigree ou marcadores moleculares. Essas informações permitem estimativas mais acuradas, aumentando a acurácia entre o valor predito e o valor real. Na literatura são encontrados diversos trabalhos que mostram que a inclusão das informações de parentesco proporcionam modelos melhor ajustados e menores valores de estimativas de variância residual (CELLON et al., 2018; OAKLEY et al., 2006; PIEPHO et al., 2008).

Ainda dentro do contexto de modelos mistos, foi introduzido o conceito de norma de reação, definido como a relação específica entre o genótipo, o fenótipo e os gradientes ambientais (WOLTERECK, 1909; DEWITT e SCHEINER, 2004; EEUWIJK et al., 2016). Assim, a metodologia de normas de reação propicia a avaliação da interação GxA e o estudo da adaptabilidade e estabilidade dos genótipos em ensaios multiambientais. A obtenção da previsão do comportamento dos genótipos, ao longo dos ambientes, é realizada com base em modelos estatísticos ajustados via metodologia de modelos mistos. Estes modelos representam a norma de reação de cada genótipo com base nos valores fenotípicos observados (EEUWIJK et al., 2016; SMITH et al., 2005; SMITH et al., 2001). Neste contexto, quando as normas de reação individuais se cruzam (não paralelas), pode-se dizer que houve interação GxA significativa. Já a variação dos genótipos em torno da norma de reação ao longo dos ambientes, com base em seus fenótipos, traduz a sua estabilidade (EEUWIJK et al., 2016; VAN OIJEN e HÖGLIND, 2016).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material genético

Foram avaliadas 105 cultivares de feijão, sendo 56 do tipo carioca e 49 do tipo preto. Estas são cultivares recomendadas no Brasil pelas instituições de melhoramento do feijoeiro desde 1959. As cultivares utilizadas bem como as instituições de origem e ano de recomendação estão relacionadas nos quadros 1 e 2.

Quadro 1. Cultivares de feijão carioca, instituições de origem e ano de recomendação

Cultivar	Instituição	Ano	Cultivar	Instituição	Ano
Carioca 1030	IAC ⁽¹⁾	1970	IPR Colibri	IAPAR	2004
Carioca 80	IAC	1980	IPR Saracura	IAPAR	2004
IAC Ayso	IAC	1980	SCS Guará	EPAGRI ⁽⁹⁾	2004
IAPAR 80	IAPAR ⁽²⁾	1980	BRSMG Pioneiro	UFV	2005
Carioca MG	UFLA ⁽³⁾	1982	IAC Votuporanga	IAC	2005
IAPAR 16	IAPAR	1986	IAC-Apuã	IAC	2005
IAC Carioca	IAC	1987	IAC-Ybaté	IAC	2005
Rio doce	INCAPER ⁽⁴⁾	1987	BRS Cometa	EMBRAPA	2006
Carioca 1070	IAC	1989	IPR Eldourado	IAPAR	2006
IAPAR 31	IAPAR	1991	IPR Siriri	IAPAR	2006
Aporé	EMBRAPA ⁽⁵⁾	1992	IAC Alvorada	IAC	2007
BR - IPA11-Brígida	EMBRAPA	1992	IPR 139	IAPAR	2007
FT bonito	FT-Sementes ⁽⁶⁾	1992	IPR Tangará	IAPAR	2008
IAPAR 57	IAPAR	1992	BRS Estilo	EMBRAPA	2009
IAC - Aruã	IAC	1993	BRS Ametista	EMBRAPA	2011
IAC - Carioca Pyatã	IAC	1994	BRS Notável	EMBRAPA	2011
Pérola	EMBRAPA	1994	IAC Formoso	IAC	2011
Rudá	EPAMIG ⁽⁷⁾ /EMBRAPA	1994	IPR Campos Gerais	IAPAR	2011
Rudá R	UFV ⁽⁸⁾	1995	BRSMG Madrepérola	UFV	2012
IAC - Carioca Akytá	IAC	1996	IAC Imperador	IAC	2013
IAPAR 81	IAPAR	1997	IAC Milênio	IAC	2013
Princesa	EMBRAPA	1997	IPR Andorinha	IAPAR	2013
Porto Real	FT-Sementes	1998	IPR Curió	IAPAR	2013
BRSMG Talismã	UFLA	2002	VC 17*	UFV	2013
BRS Requite	EMBRAPA	2003	VC15*	UFV	2013
BRS Horizonte	EMBRAPA	2004	IPR Bem-te-vi	IAPAR	2014
BRS Majestoso	UFLA	2004	IPR Quero-Quero	IAPAR	2014
BRS Pontal	EMBRAPA	2004	BRS UAI	UFLA	2015

⁽¹⁾Instituto Agronômico de Campinas; ⁽²⁾Instituto Agronômico do Paraná; ⁽³⁾Universidade Federal de Lavras; ⁽⁴⁾ Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural; ⁽⁵⁾Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; ⁽⁶⁾Empresa privada; ⁽⁷⁾Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais; ⁽⁸⁾ Universidade Federal de Viçosa; ⁽⁹⁾Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. *Linhagens-elites do Programa Feijão – UFLA.

Quadro 2: Cultivares de feijão preto, instituições de origem e ano de recomendação

Cultivar	Instituição	Ano	Cultivar	Instituição	Ano
Rico 23	UFV ⁽¹⁾	1959	IAC-Maravilha	IAC	1993
Rio Tibagi	Fepagro ⁽²⁾	1971	IAPAR 65	IAPAR	1993
Moruna	IAC ⁽³⁾	1978	Xamego	PESAGRO/EMBRAPA	1993
Capixaba Precoce	INCAPER ⁽⁴⁾	1980	IAC-Una	IAC	1994
IRAÍ	IPAGRO ⁽⁵⁾	1981	Meia Noite	EPAMIG/UFV	1994
IAPAR 8-Rio Negro	IAPAR ⁽⁶⁾	1983	IPR Uirapurú	IAPAR	2000
Milionário 1732	UFV/EPAMIG ⁽⁷⁾	1983	BRS Valente	EMBRAPA	2001
BR 1- Xodó	PESAGRO ⁽⁸⁾ /EMBRAPA	1985	IPR Graúna	IAPAR	2002
BR-2 Grande Rio	PESAGRO/EMBRAPA ⁽⁹⁾	1985	BRS Campeiro	EMBRAPA	2003
BR-3 Ipanema	PESAGRO/EMBRAPA	1985	BRS Grafite	EMBRAPA	2003
FT 120	FT-Sementes ⁽¹⁰⁾	1986	BRS Supremo	EMBRAPA	2004
IAPAR 20	IAPAR	1987	IPR Chopin	IAPAR	2004
BR-IPAGRO Macanudo	EMBRAPA	1989	IAC Tunã	IAC	2005
Pampa	EMBRAPA	1989	BRS Esplendor	EMBRAPA	2006
BR 6-Barriga verde	EMBRAPA	1990	IPR Tiziu	IAPAR	2006
IAPAR 44	IAPAR	1990	BRS Expedito	EMBRAPA	2007
Preto Uberabinha	IPEACO ⁽¹¹⁾	1990	IAC- Diplomata	IAC	2007
Rico 1735	IPEACO	1990	IPR Galha	IAPAR	2007
Diamante Negro	EMBRAPA/EMGOPA ⁽¹²⁾	1991	BRS Agreste	EMBRAPA	2009
Macotaço	EMBRAPA	1991	IPR Tuiuí	IAPAR	2010
Minuano	EMBRAPA	1991	BRS Esteio	EMBRAPA	2012
Varre-Sai	PESAGRO/EMBRAPA	1991	VP 22*	UFV	2013
BR- IPA 10	IPA ⁽¹³⁾ /EMBRAPA	1992	VP 33*	UFV	2013
Onix	EMBRAPA	1992	IPR Inhambu	IAPAR	2015
Ouro Negro	UFV/EPAMIG	1992			

⁽¹⁾Universidade Federal de Viçosa; ⁽²⁾Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária; ⁽³⁾Instituto Agrônomo de Campinas; ⁽⁴⁾Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural; ⁽⁵⁾Instituto de Pesquisas Agronômicas; ⁽⁶⁾ Instituto Agrônomo do Paraná; ⁽⁷⁾ Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais; ⁽⁸⁾Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro; ⁽⁹⁾Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; ⁽¹⁰⁾Empresa privada; ⁽¹¹⁾Instituto de Pesquisa e Experimentação Agropecuária do Centro-Oeste; ⁽¹²⁾Empresa Goiana de Pesquisa Agropecuária; ⁽¹³⁾Instituto Agrônomo de Pernambuco. *Linhagens-elites do Programa Feijão – UFV.

3.2. Experimentos e caracteres avaliados

Para avaliação das cultivares de feijão carioca e preto foram conduzidos 13 experimentos em diferentes ambientes (combinação de anos, locais e safras), durante as safras da seca e de inverno, entre os anos de 2013 e 2018, na Estação Experimental no Município de Coimbra - MG (latitude: 20°49'44" S, longitude: 42°45'56" W, altitude: 713 m) e nas Estações Experimentais no Município de Viçosa - MG (Aeroporto: 20°44'38" S, longitude:

42°50'40", altitude: 654m; Horta Nova: 20°45'47" S, longitude: 42°49'25", altitude: 664m; Vale da Agronomia: 20°46'04" S, longitude: 42°52'11", altitude: 662m). Todas estas estações pertencem ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa. Ao longo dos ensaios, cultivares recém lançadas pelos programas de melhoramento foram adicionadas aos experimentos, causando assim desbalanceamento genético (variação do número de cultivares entre os experimentos).

Os experimentos foram conduzidos em delineamento de blocos ao acaso com três repetições. As parcelas foram constituídas de quatro linhas de dois metros (m), espaçadas de 0,5 m entre si. Os tratos culturais empregados foram de acordo com o recomendado para a cultura na região (CARNEIRO et al., 2015). Os trabalhos de campo (plantio, tratos culturais, colheita e trilha) foram realizados sempre que necessário. Foram utilizados dados obtidos em experimentos por Barili et al. (2015) e Possobom (2018). Nos experimentos foram avaliadas as seguintes características:

- a) arquitetura de plantas (ARQ) - avaliação realizada por meio de escala de notas, onde 1 - planta ereta, 5 - planta prostrada (Collicchio et al, 1997).
- b) aspecto de grão (AG) – avaliação baseada em escala de notas, onde 1 - cor, formato e tamanho com bom padrão comercial, 5 - grãos fora do padrão comercial (Ramalho et al., 1998).
- c) severidade de antracnose (ANT) - avaliação baseada em escala de notas de 1 a 9 para severidade da doença, onde 1 – planta sadia, 9 – planta morta (Pastor-Corrales, 1992).
- d) severidade de ferrugem (FER) - avaliação baseada em escala de notas de 1 a 6 para severidade da doença, onde 1 – planta sadia, 6 – planta morta (Staveley et al., 1983).
- e) severidade de mancha angular (MAN) - avaliação baseada em escala de notas de 1 a 9 para severidade da doença, onde 1 – planta sadia, 9 – planta morta (Amaro et al., 2007);
- f) produtividade de grãos (PROD) – pesagem dos grãos colhidos das duas linhas centrais de cada parcela. Os dados foram corrigidos para 13% de umidade e extrapolados para kg ha⁻¹.

Os experimentos, aqui denominados de ambientes, são relacionados no quadro 3.

Quadro 3: Experimentos conduzidos pelo Programa Feijão – UFV e utilizados neste trabalho

Experimento	Safra	Ano	Unidade experimental ⁽¹⁾	Nº cultivares
1	Seca	2013	Unidade de Coimbra	80
2	Seca	2013	Unidade Vale da Agronomia	80
3	Inverno	2013	Unidade de Coimbra	80
4	Inverno	2013	Unidade Vale da Agronomia	80
5	Seca	2015	Unidade de Coimbra	100
6	Inverno	2015	Unidade de Coimbra	100
7	Seca	2016	Unidade de Coimbra ⁽²⁾	100
8	Seca	2016	Unidade Aeroporto	104
9	Seca	2016	Unidade de Coimbra ⁽³⁾	104
10	Inverno	2016	Unidade de Coimbra	104
11	Inverno	2016	Unidade Horta Nova	104
12	Seca	2017	Unidade Aeroporto	105
13	Inverno	2017	Unidade de Coimbra	105

¹As unidades experimentais de experimentação pertencem ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa. ^{2,3}Experimentos diferentes quanto a data de plantio.

3.3. Análises individuais de variância

Os dados de arquitetura de planta, aspecto comercial de grão, severidade de antracnose, ferrugem e mancha angular e produtividade foram inicialmente analisados em cada ambiente de forma individual. As análises de variância foram realizadas de acordo com o modelo:

$$y_{ij} = \mu + G_i + B_j + E_{ij},$$

onde: y_{ij} é a observação referente à i -ésima cultivar ($i = 1, 2, \dots, g$, sendo g o número total de cultivares em cada ambiente) no j -ésimo bloco ($j = 1, 2, 3$), μ é a média geral do experimento, G_i é o efeito aleatório de cultivares, B_j é o efeito aleatório de blocos e e_{ij} é o efeito devido ao erro aleatório.

Adicionalmente, foram calculadas as estimativas para os seguintes parâmetros genéticos em cada ambiente:

i) Média

A média para cada característica (\bar{y}_{ijk}), considerando os ambientes avaliados, foi calculada da seguinte forma:

$$\bar{y}_{ijk} = \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^a \sum_{k=1}^3 y_{ijk}$$

onde y_{ijk} é a observação da i -ésima cultivar ($i = 1, 2, \dots, g$, onde g é o número de cultivares no ambiente), no j -ésimo ambiente ($j = 1, 2, \dots, a$, onde a é o número total de ambientes em que a característica foi avaliada), no k -ésimo bloco ($k = 1, 2, 3$).

ii) Coeficiente de variação ambiental (CV)

O CV para produtividade de grãos em cada ambiente, em porcentagem, foi calculado com a seguinte fórmula:

$$CV = \frac{100 * \sqrt{QMR}}{\bar{X}}$$

sendo QMR o quadrado médio de resíduo obtido nas análises individuais.

Para resultados mais apropriados, devido as diferentes escalas de notas utilizadas para as características arquitetura, aspecto de grãos e severidade de antracnose, ferrugem e mancha angular, o CV destas características foi calculado conforme proposição de Dos Anjos et al. (2019), sendo dado por:

$$CV = \frac{100 * \sqrt{QMR}}{|\bar{X} - \mu|}$$

sendo μ a nota dada ao fenótipo indesejado (maior nota).

iii) Acurácia seletiva

A acurácia seletiva individual para cada ambiente (r_j) foi calculada com a seguinte fórmula:

$$r_j = \left(1 - \frac{1}{F_j}\right)^{0,5}$$

sendo F_j , a razão entre o quadrado médio de cultivares (QMG) e QMR para cada ambiente j , obtidos nas análises individuais.

3.4. Análise conjunta de variância

3.4.1. Classificação ambiental

A classificação ambiental foi realizada através do índice ambiental, proposto por Finlay e Wilkinson (1963). Os ambientes foram classificados em dois grupos: favoráveis ou desfavoráveis, sendo essa classificação determinada pelo sinal do índice. Valores de índices

negativos indicam ambientes desfavoráveis, enquanto valores positivos indicam ambientes favoráveis. O índice é dado por: $I_j = \bar{Y}_j - \bar{Y}$, onde: \bar{Y}_j é a média das cultivares no ambiente j ($j = 1, 2, \dots$, na ambientes) e \bar{Y} é a média geral. Foram utilizados os dados das 105 cultivares avaliados no trabalho

3.4.2. Modelos de norma de reação

Para a análise conjunta, modelos de norma de reação foram testados para identificar o que melhor se ajusta ao desempenho das cultivares quanto à produtividade de grãos. Ao todo, foram testados 14 modelos, sendo sete deles considerando a variância residual homogênea (σ_e^2) e os outros sete considerando variâncias residuais heterogêneas nos ambientes avaliados ($\sigma_{e_1}^2, \sigma_{e_2}^2, \dots, \sigma_{e_j}^2, j = 1, 2, \dots, na$, em que na é o número total de ambientes). Os modelos foram ajustados com os polinômios de Legendre para efeitos fixos e aleatórios, considerando as várias ordens de ajuste.

Assim, utilizou-se o seguinte modelo geral:

$$y_{ijk} = A_j + R/A_{jk} + \sum_{m=0}^{M-1} \alpha_{im} \Phi_{ijm} + e_{ijk}$$

em que: y_{ijk} é a observação da i -ésima cultivar ($i = 1, 2, \dots, g$, onde g é o número total de cultivares), no j -ésimo ambiente ($j = 1, 2, \dots, na$, onde na é o número total de ambientes), no k -ésimo bloco ($k = 1, 2, 3$); A_j é o efeito fixo de ambiente; R/A_{jk} é o efeito fixo de blocos dentro de ambiente; α_{im} é o coeficiente de norma de reação para o polinômio de Legendre de ordem m para o efeito genotípico de cultivares; Φ_{ijm} é o m -ésimo polinômio de Legendre para a j -ésimo ambiente, padronizado de -1 a +1 para a i -ésima cultivar; M é a ordem de ajuste do polinômio de Legendre para os efeitos genotípicos, variando de zero a seis e e_{ijk} é o efeito aleatório residual associado a y_{ijk} .

Na notação matricial, o modelo geral acima é descrito da seguinte forma: $y = Xb + Zg + e$, onde: y é o vetor de dados fenotípicos; b é o vetor dos efeitos fixos da combinação blocos x ambientes adicionado à média geral; g é o vetor de efeitos genéticos (assumido como aleatório); e é o vetor de resíduo (aleatório). X e Z representam as matrizes de incidência para esses efeitos, respectivamente. Assume-se que: $g \sim N(0, Kg \otimes I_{ng})$, e $e \sim N(0, I_{np} \otimes \Sigma)$, onde I_{ng} e I_{np} são matrizes identidade de ordem ng (sendo ng o número total de cultivares) e np (onde np é o número de cultivares x o número de repetições), respectivamente. O símbolo \otimes

denota o produto de Kronecker. K_g é a matriz dos coeficientes de covariância para efeito genotípico. Já Σ representa a matriz de variâncias residuais. Foram testadas as estruturas de variâncias residuais homogênea (Ho) e heterogênea (He).

$$Ho = \begin{bmatrix} \sigma_e^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_e^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_e^2 \end{bmatrix}$$

$$He = \begin{bmatrix} \sigma_{e_1}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{e_2}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{e_j}^2 \end{bmatrix}$$

Diferentes graus dos polinômios ortogonais de Legendre foram ajustados a fim de determinar um modelo com melhor ajuste (menor erro quadrático médio e maior parcimônia). Os modelos de normas de reação foram comparados utilizando o teste da razão de verossimilhança (LRT – Likelihood Ratio Test; RAO, 1965) e o critério de informação bayesiano de Schwarz (BIC - Bayesian Information Criterion), sendo que $BIC = -2 \text{Log}L + p \text{Log} [n - r(x)]$, onde: $\text{Log}L$ é o logaritmo da função de verossimilhança; p é o número de parâmetros estimados; n é o número de observações e $r(x)$ é o rank ou posto da matriz de incidência dos efeitos fixos (WOLFINGER, 1993).

Foi usada a metodologia de Kirkpatrick et al. (1990), baseada no estimador a seguir, para obter os componentes de variância $\hat{\sigma}_{gjj}^2$ e covariância $\hat{\sigma}_{jj}$, na escala original: $\hat{\sigma}_{gjj}^2 = \Phi_{ijm} \hat{K}_g \Phi'_{ijm}$. O termo Φ_{ijm} foi definido no tópico modelos de normas de reação; \hat{K}_g é a matriz de covariâncias dos coeficientes estimada para o efeito aleatório (genotípico).

Os valores genotípicos \hat{g}_{ij} foram preditos da seguinte forma:

$$\hat{g}_{ij} = \sum_{m=0}^{M-1} \hat{\alpha}_{im} \Phi_{ijm}$$

em que: $\hat{\alpha}_{im}$ é o coeficiente de norma de reação de ordem m para os efeitos genéticos da i -ésima cultivar.

3.4.3. Significância dos efeitos genéticos

Para testar a significância dos efeitos genéticos em cada modelo, também foi utilizado o teste LRT calculado da seguinte forma:

$$LRT = -2*(\text{Log}L_{\text{mod.r}} - \text{Log}L_{\text{mod.c}}),$$

em que: $\text{Log}L_{\text{mod.r}}$ é o valor do logaritmo do máximo da função de verossimilhança obtido para o modelo reduzido (sem o efeito de cultivar) e $\text{Log}L_{\text{mod.c}}$ valor do logaritmo do máximo da função de verossimilhança obtido para o modelo completo.

3.4.4. Acurácia de predição

A acurácia de predição foi estimada conforme a seguinte equação:

$$r_{\hat{g}_{ij}} = \sqrt{1 - \frac{PEV_{ij}}{\hat{\sigma}_{gj}^2}}$$

onde: $r_{\hat{g}_{ij}}$ é a correlação entre o valor genotípico predito e o real para a cultivar i no ambiente j , ou seja, a acurácia estimada e PEV_{ij} é a variância do erro de predição (Predicted Error Variance) para a cultivar i no ambiente j . $\hat{\sigma}_{gj}^2$ é o componente de variância genotípica estimado para o ambiente j .

3.4.5. Adaptabilidade e estabilidade das cultivares

A partir da distância cultivar-ideótipo (convertida para probabilidade), obteve-se a classificação das cultivares em função dos três possíveis cenários ambientais: cultivares de adaptabilidade geral, adaptabilidade específica a ambientes desfavoráveis e adaptabilidade específica a ambientes favoráveis. Esta probabilidade contempla ainda a estabilidade fenotípica das cultivares. Complementando, as cultivares foram separadas em função do tipo de grão, sendo preto ou carioca. A seguinte fórmula representa o cálculo da probabilidade para cada genótipo i (distância cultivar – ideótipo):

$$Probabilidade_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^{na} [\hat{g}_{ij} - \max(\hat{g}_j)]^2} \times 100$$
$$\sum_{k=1}^{ng} \left\{ \frac{1}{\sum_{j=1}^{na} [\hat{g}_j - \max(\hat{g}_j)]^2} \right\}$$

onde, o ideótipo ($\max(\hat{g}_j)$) foi definido como o valor genético predito máximo em cada ambiente.

Assim, as 10 cultivares de feijão preto e carioca que mais se aproximaram do ideótipo proposto foram selecionadas para plotagem das curvas com as respectivas normas de reação. Foi adicionado ainda o valor genético predito de cada cultivar, somado a média do ambiente e a média geral, além de uma testemunha para efeito de comparação. Foram utilizadas as testemunhas Pérola (carioca) e Ouro Negro (preto). A razão para que se tenha utilizado essas duas cultivares como padrões está fundamentada no fato de que elas são referências quanto à produtividade e qualidade de grãos pelo mercado consumidor. (MELO et al., 2006).

Os dados fenotípicos das cultivares selecionadas pelos modelos de norma de reação foram ainda comparadas com as testemunhas via teste de médias de Dunnett, a 5% de probabilidade, baseado na diferença mínima significativa (DMS), obtido em:

$$DMS = d_{\alpha}(k, N - k) \sqrt{\frac{2QMR}{r}}$$

em que $d_{\alpha}(k, N - k)$ é um valor tabelado proposto por Dunnett, que depende do número de níveis (k) e dos graus de liberdade dos erros ($N-k$), QMR é o quadrado médio de resíduos obtido na análise conjunta e r é o número de repetições.

3.5. Softwares utilizados

A análise conjunta foi realizada no software ASREML (GILMOUR et al., 2015). O estudo da adaptabilidade e estabilidade das cultivares foram realizadas no software R (Software R, 2015).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análises individuais de variância

Para as características produtividade de grãos, arquitetura de plantas, nota de grãos e severidade de ferrugem verificou-se significância para cultivares pelo teste F ($p < 0,05$) em todos os respectivos ambientes avaliados (Tabela 1). Para a severidade de antracnose, houve significância para os efeitos de cultivares na maioria dos ambientes (com exceção do ambiente 11), enquanto para severidade de mancha angular não houve significância nos ambientes 8, 10 e 11. Vale destacar que não ocorreu inoculação dos patógenos nos experimentos, sendo a ocorrência observada devido a incidência natural. Trabalhos na literatura apontam que a incidência de ferrugem, antracnose e mancha angular dependem da ocorrência de fatores climáticos favoráveis, como temperatura e água, além da presença de inóculo na área para ocorrência significativa, indicando que a ausência de variação entre cultivares ao longo dos ambientes pode ser explicada por estes fatores (CAMPOS A. e FUCIKOVSKY ZAK, 1980; SARTORATO, 1988; VALE e ZAMBOLIM, 1966).

A produtividade de grãos média nos ambientes variou de 1.890 a 4.790 kg ha⁻¹, indicando a diversidade de condições ambientais nos experimentos. Os ambientes avaliados apresentam diferenças em termos de fertilidade, temperatura, precipitação, fatores bióticos e etc., o que de certa forma influencia no desempenho dos genótipos.

As médias fenotípicas para os caracteres arquitetura de planta e aspecto de grão situaram em torno de três, um valor intermediário, considerando escala de notas variando de um a cinco. Sendo notas próximas da unidade indicadas como o ideótipo, pode-se notar que ainda há potencial a ser explorado no melhoramento para estas características, na busca de cultivares com arquitetura ereta de plantas, visando a colheita mecanizada, e grãos com aspecto e qualidade conforme o padrão comercial, para atender as exigências do consumidor. Melo et al. (2007) reitera em seu trabalho a importância a ser dada a qualidade comercial para o mercado de feijão, pois ela é determinante na preferência do consumidor. Com relação as notas de severidade de doenças, as baixas médias observadas indicam que as cultivares se mostraram resistentes aos patógenos, entretanto, esta afirmativa pode não ser válida, reafirmando a necessidade de inoculação dos patógenos para resultados mais concisos.

O coeficiente de variação ambiental (CV) para produtividade variou de 8 a 25 % entre os ambientes. Barili et al. (2015), Carbonell et al. (2010) e Silva et al. (2013) em

experimentos de comparação de cultivares, encontraram CV's menores que 25%, indicando que os experimentos utilizados tiveram variações residuais dentro dos padrões de outros trabalhos com a cultura. Para os caracteres arquitetura de plantas e aspecto de grãos, os CV's situaram-se abaixo de 38% e 28%, respectivamente. Apesar de ser um valor elevado, estes resultados são aceitáveis, uma vez que a avaliação é feita de forma visual, o que induz a um maior erro associado à avaliação. Vale ressaltar que estes são os valores não-viesados de CV, conforme correção proposta por Dos Anjos et al. (2019). Para severidade de doenças, notou-se variação no CV de 1 a 23%, indicando baixo erro experimental. Entretanto, como não houve inoculação de patógenos nos experimentos, a ausência de sintomas resultou em uniformidade de notas ao longo das repetições (nota um), o que acarreta em elevada precisão experimental, uma vez que não houve variações entre repetições.

Além do CV, outro parâmetro frequentemente avaliado em experimentos é a acurácia seletiva, sendo ela também uma medida de avaliação da qualidade experimental (RESENDE e DUARTE, 2007). A acurácia, por estar associada aos valores de variabilidade genética e residual, indica aqueles experimentos favoráveis a seleção. Para que experimentos apresentem valores de acurácia elevados, estes devem ter variabilidade genética para discriminação dos genótipos e baixa variação residual, afim de se obter resultados mais confiáveis. Desta forma, observou-se que a acurácia seletiva ao longo dos ambientes foi, de forma geral, elevada para os caracteres produtividade, arquitetura de plantas e aspecto de grãos, indicando experimentos de qualidade para a discriminação dos genótipos.

Resende e Duarte (2007) apresentaram uma classificação para acurácia, onde valores de 0,5 a 0,69 indicam acurácia moderada, 0,7 a 0,89 alta e acima de 0,9 indicam acurácia muito alta. Este parâmetro tem a capacidade de informar sobre o correto ordenamento das cultivares para fins seleção e a eficácia da inferência acerca do valor genotípico da cultivar. Vale destacar que a acurácia é uma medida dependente da variação residual, do número de repetições dos experimentos e das variações devido ao efeito das cultivares (RESENDE, 2002). Ademais, ela traz a informação sobre a qualidade dos procedimentos utilizados na predição dos valores genéticos (CARGNELUTTI FILHO e STORCK, 2010).

Tabela 1: Resumo das análises individuais de variância de cada característica nos respectivos ambientes avaliados

Parâmetro	Ambientes													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Aspecto de grão	Média	3408,45	3028,65	3049,55	2314,6	2946,92	2751,48	3181,16	2455,42	2053,18	2421,09	3680,83	1891,28	4790,68
	QMG ⁽¹⁾	1691386**	846349**	1229003**	737714**	605041**	894268**	802390**	351548*	492910**	474763**	1023698**	725044**	676241**
	CV% ⁽²⁾	10,59	12,83	9,07	8,29	17,62	24,61	15,9	20,92	20,25	14,72	19,34	25,18	11,21
	Acurácia	0,96	0,90	0,96	0,97	0,74	0,69	0,82	0,49	0,80	0,85	0,71	0,83	0,76
Arquitetura Produtividade	Média	3,29	3,73	3,8	3,91	3,16	-	2,79	2,48	2,64	2,51	2,77	-	-
	QMG	1,85**	1,38**	1,97**	1,08**	0,50**	-	0,64**	0,56**	0,84**	0,76**	0,43**	-	-
	CV%	27,83	37,03	39,22	24,77	31,10	-	18,04	21,57	19,24	14,61	16,25	-	-
	Acurácia	0,94	0,92	0,94	0,97	0,59	-	0,86	0,68	0,87	0,91	0,83	-	-
Antraenose	Média	2,83	2,88	2,67	2,94	-	-	2,76	2,66	2,97	2,66	-	-	-
	QMG	2,52**	2,17**	1,38**	2,04**	-	-	1,73**	1,32**	2,14**	1,32**	-	-	-
	CV%	15,2	20,26	19,77	23,59	-	-	20,12	19,21	27,65	19,21	-	-	-
	Acurácia	0,97	0,95	0,92	0,94	-	-	0,93	0,92	0,92	0,92	-	-	-
Ferrugem	Média	-	-	-	-	-	-	1,27	1,06	1,22	1,27	1,08	-	-
	QMG	-	-	-	-	-	-	2,85**	0,35**	1,20**	3,12**	0,36ns	-	-
	CV%	-	-	-	-	-	-	12,55	5,89	10,59	9,00	7,75	-	-
	Acurácia	-	-	-	-	-	-	0,81	0,62	0,65	0,91	0	-	-
Mancha Angular	Média	-	-	-	-	-	-	1,08	1,11	1,65	1,21	-	-	
	QMG	-	-	-	-	-	-	0,47*	0,38**	3,67**	0,71**	-	-	
	CV%	-	-	-	-	-	-	11,85	6,14	23,45	13,98	-	-	
	Acurácia	-	-	-	-	-	-	0,52	0,87	0,84	0,60	-	-	
Mancha Angular	Média	-	-	-	-	-	-	3,26	1,33	3,8	1,09	1,01	-	-
	QMG	-	-	-	-	-	-	2,51**	0,80ns	5,71**	0,21ns	0,02ns	-	-
	CV%	-	-	-	-	-	-	12,18	11,05	22,68	5,90	1,57	-	-
	Acurácia	-	-	-	-	-	-	0,89	0,32	0,86	0	0	-	-

¹Quadrado médio de cultivares; ²coeficiente de variação experimental (em porcentagem); **significativo a 1% de probabilidade; *significativo a 5% de probabilidade; ^{ns}não-significativo.

4.2. Análise conjunta de variância

4.2.1. Classificação ambiental

Para determinar a classificação dos ambientes em favoráveis ou desfavoráveis, eles foram ordenados em ordem crescente de acordo com seus respectivos índices ambientais (Tabela 2). Valores positivos de índice ambiental indicam ambientes favoráveis, enquanto valores negativos apontam aqueles desfavoráveis (CRUZ et al., 2012). Dessa forma, os ambientes 12, 9, 4, 10, 8 e 6 foram classificados como desfavoráveis, pois apresentaram índices negativos, enquanto os ambientes 5, 2, 3, 7, 1, 11, 13 podem ser designados como favoráveis devido aos valores positivos. Valores de índice ambiental negativo indicam ambientes com médias inferiores à média geral e vice-versa. Segundo Oliveira et al. (2003), a caracterização ambiental traz confiança para as respostas das cultivares de acordo com o ambiente onde são avaliados, permitindo uma recomendação mais precisa.

Nota-se que não houve qualquer relação entre os ambientes quanto ao índice ambiental, de forma que experimentos avaliados em mesmos locais e anos, porém com datas de plantio diferentes (por exemplo, ambientes 7 e 9) mostraram-se muito diferentes, enquanto experimentos avaliados em diferentes safras, locais e anos (por exemplo, ambientes 1 e 11) tiveram desempenho semelhante. Essa variação é causada principalmente pelas variações edafoclimáticas, o que acarreta também na incidência de pragas e doenças. Barili et al. (2015), Melo et al. (2007), Moura et al. (2013), Ribeiro et al. (2008) mostraram em seus trabalhos a influência destes fatores ambientais na classificação ambiental, alterando a expressão dos genes e contribuindo para a interação GxA significativa.

A variação observada ao longo dos ambientes permite concluir a forte interação cultivar x local x ano, resultando na variação do desempenho das cultivares ao longo dos ambientes. Ramalho et al. (1998) mostraram em seu trabalho que as contribuições mais expressivas para a variação ambiental são devidas as interações cultivares x safras e cultivares x anos. Esses autores ainda reforçam a importância da realização dos ensaios em vários anos e épocas de semeadura para a avaliação da interação GxA no processo de recomendação de cultivares de feijão.

Tabela 2: Ambientes avaliados com os respectivos índices ambientais

Ambiente	12	9	4	10	8	6	
Índice ambiental	-1028,89	-868,67	-607,25	-500,76	-466,43	-167,35	
Ambiente	5	2	3	7	1	11	13
Índice ambiental	31,02	106,80	127,71	259,39	486,60	758,98	1868,83

4.2.2. Modelos testados

Todos os modelos testados apresentaram significância para o efeito genético, pelo critério LRT, indicando que podem ser utilizados para a realização da análise conjunta. (Tabela 3). O modelo de melhor ajuste foi o denominado Leg.5.D, pois apresentou o menor valor para o critério de informação bayesiano de Schwarz (BIC). Neste modelo, o efeito aleatório de cultivares foi modelado como funções lineares via polinômios ortogonais de Legendre, com grau cinco e variância residual heterogênea. Assim, foram estimados 34 parâmetros, sendo 13 associados aos resíduos, ou seja, um para cada ambiente, e 21 relacionados aos componentes genotípicos do modelo. Vale destacar que ocorreu grande heterogeneidade na série de ambientes avaliados, como verificado pelas variâncias residuais nas análises individuais (Tabela 1), o que justifica a utilização de modelos com estrutura residual diagonal para uma melhor estimação dos componentes.

Tabela 3. Diferentes modelos ajustados com polinômios ortogonais de Legendre (Leg)

Modelo	Estrutura residual	Grau ¹	GL resíduo	P ²	Convergência do Log L	BIC ³	LRT ⁴
Leg.0.H	Homogênea	0	3692	2	LogL convergido	11318,93	377,68**
Leg.1.H	Homogênea	1	3692	4	LogL convergido	11312,44	400,6**
Leg.2.H	Homogênea	2	3692	7	LogL convergido	11298,80	438,88**
Leg.3.H	Homogênea	3	3692	11	LogL convergido	11286,41	484,12**
Leg.4.H	Homogênea	4	3692	16	LogL convergido	11290,86	520,74**
Leg.5.H	Homogênea	5	3692	22	LogL convergido	11286,35	574,54**
Leg.6.H	Homogênea	6	3692	29	LogL convergido	11314,60	603,78**
Leg.0.D	Diagonal	0	3692	14	LogL convergido	11093,69	507,64**
Leg.1.D	Diagonal	1	3692	16	LogL convergido	11082,82	534,94**
Leg.2.D	Diagonal	2	3692	19	LogL convergido	11046,48	595,92**
Leg.3.D	Diagonal	3	3692	23	LogL convergido	11008,06	667,2**
Leg.4.D	Diagonal	4	3692	28	LogL convergido	10913,61	802,72**
Leg.5.D	Diagonal	5	3692	34	LogL convergido	10859,39	906,22**
Leg.6.D	Diagonal	6	3692	41	LogL convergido	10900,15	922,96**

¹Grau do polinômio de Legendre para o efeito genético; ²número de parâmetros estimados pelo modelo; ³critério de informação bayesiana de Schwarz; ⁴teste de razão de verossimilhança para efeitos genéticos; **significativo a 1% de probabilidade.

4.2.3. Acurácia de predição

A acurácia considerando apenas as cultivares que estavam presentes em todos os ambientes foi a mais elevada (Figura 1, linha b). Esse é o resultado esperado, uma vez que a acurácia é diretamente proporcional aos dados obtidos em maior número de ambientes. Devido à esta relação, as estimativas de acurácia para as cultivares avaliadas em apenas dois ambientes foram as menores, com valores intermediários para aquelas avaliadas em seis e nove ambientes. Ainda assim, verificou-se que os modelos de norma de reação permitem a predição de valores genotípicos para os ambientes em que as cultivares não foram avaliadas, sendo a acurácia tanto maior quanto mais ambientes utilizados.

Nota-se ainda na figura 1, que a acurácia foi menor nos ambientes seis e oito. Observando a tabela das análises individuais (tabela 1), nota-se que estes dois experimentos também apresentaram os menores valores de acurácia seletiva. Sendo esta um indicativo de baixa precisão experimental, a qualidade inferior destes experimentos também afetou a acurácia de predição. Cargnelutti Filho e Storck (2010) afirmam que a acurácia seletiva apresenta relação direta com a variância genotípica e relação inversa com a variância residual.

Assim, é evidenciado que ensaios com maiores valores de variância genotípica e/ou menor variância residual apresentam maior acurácia. Na literatura, alguns trabalhos mostram a precisão nas estimativas de acurácia de predição utilizando modelos de norma de reação, indicando assim a eficiência no uso desta medida na avaliação da precisão de experimentos no melhoramento de plantas (BURGUEÑO et al., 2012; JARQUÍN et al., 2014; PÉREZ-RODRÍGUEZ et al., 2015).

Uma possível razão pela baixa acurácia observada nos ambientes 12 e 13 pode ser explicada por estes serem os experimentos que contém o maior número de cultivares que não foram avaliados em outros ambientes. Assim, como estes ambientes tiveram muitos dados preditos, é esperado uma menor acurácia para cada cultivar e, conseqüentemente, uma menor acurácia média para os respectivos ambientes.

Por fim, verificou-se de forma geral, que os valores de acurácia de predição média situaram próximos ou superiores a 90% para a maioria dos ambientes avaliados, considerado um valor elevado segundo a classificação de Resende e Duarte (2007). Henderson (1984) afirma que valores de acurácia próximos da unidade ou 100 % indicam experimentos adequados na avaliação de cultivares.

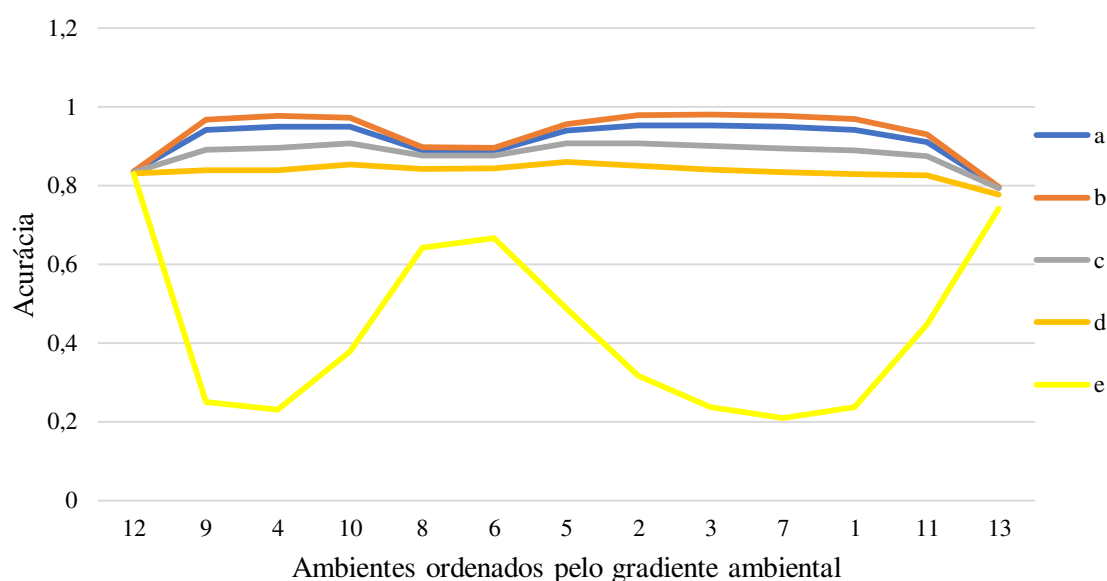
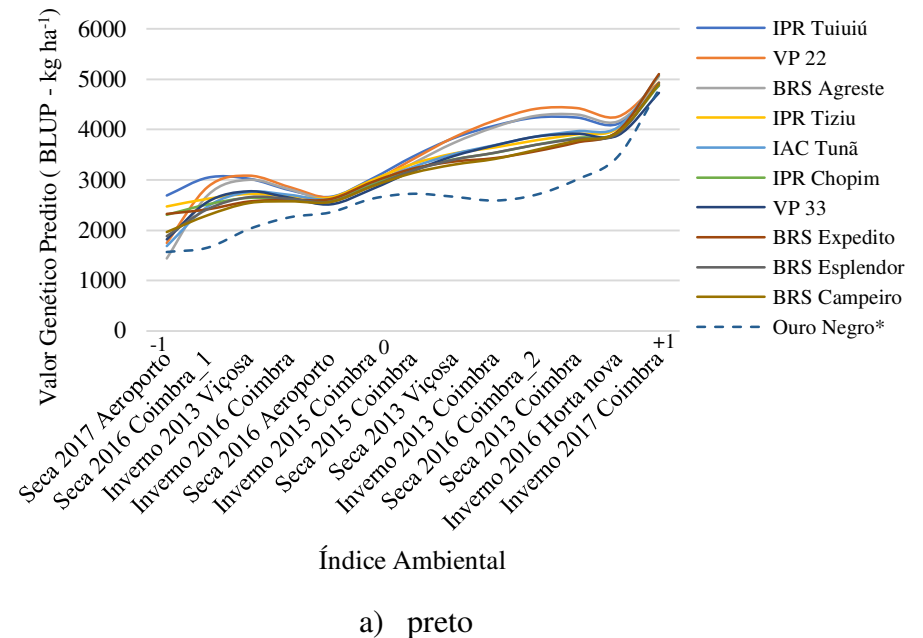
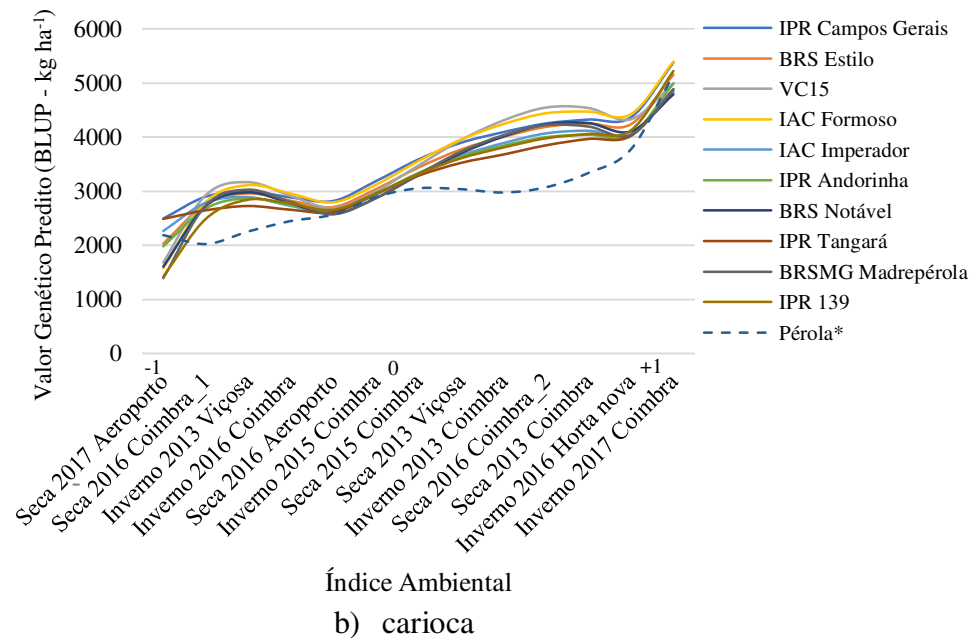


Figura 1: Acurácia de predição média em cada ambiente, considerando: a) todas as cultivares (105 cultivares); b) cultivares presentes em 13 ambientes (80 cultivares); c) presentes em nove (20 cultivares); d) presentes em seis (4 cultivares); e e) presentes em apenas dois ambientes (1 cultivar).

4.2.4. Adaptabilidade e estabilidade das cultivares

A análise de adaptabilidade e estabilidade foi realizada considerando apenas 100 das 105 cultivares (cultivares presentes em nove ambientes). Este embasamento foi de acordo com a acurácia de predição média calculada no item 3.4.4 e apresentada na figura 1, onde mostra que a acurácia média para estas cultivares foi superior a 80% em todos os ambientes. Quando se utilizam experimentos com dados desbalanceados ou apenas uma amostra das cultivares, as estimativas de acurácia de predição tendem a serem menores, podendo o modelo não ser eficiente na avaliação do desempenho das cultivares (LIAN et al., 2014; LORENZANA e BERNARDO, 2009).

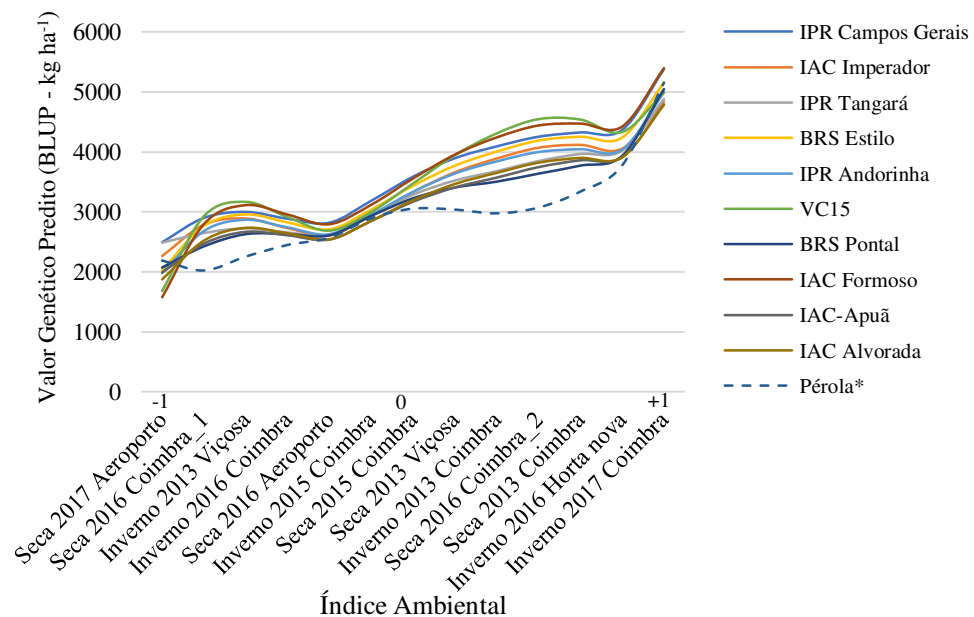
Na figura 2, estão as dez cultivares de feijão carioca (a) e preto (b) melhor caracterizadas ao cenário de adaptabilidade geral (maiores probabilidades) com base na metodologia de norma de reação. Os ambientes foram posicionados conforme o índice ambiental. As variações diferenciais do desempenho das cultivares ao longo dos ambientes mostraram que houve interação GxA significativa. Verificou-se que estas cultivares foram superiores às testemunhas Pérola e Ouro Negro na maioria dos ambientes, indicando ampla adaptação.



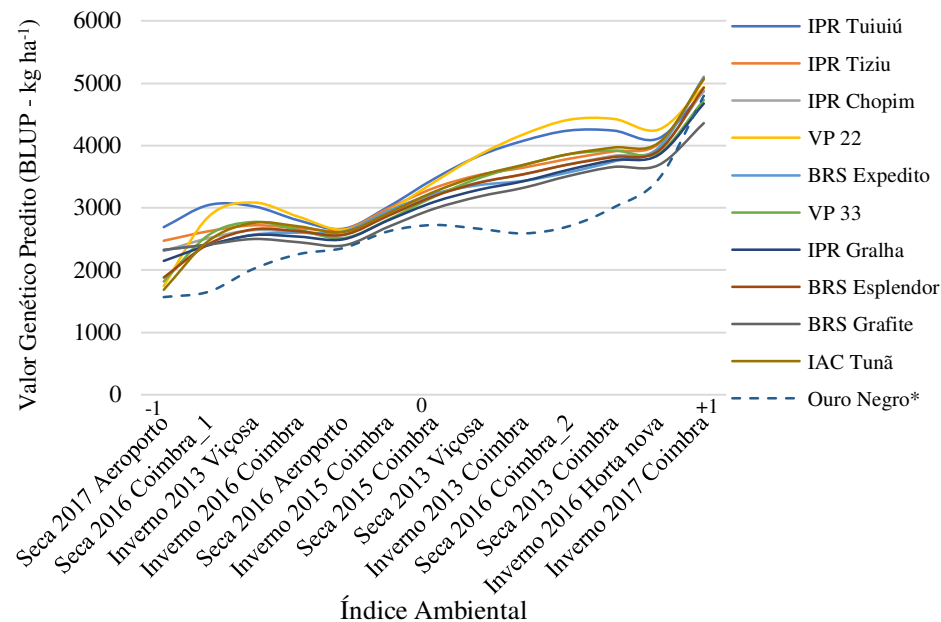
*Cultivares usadas como testemunhas.

Figura 2. Normas de reação para a produtividade de grãos das dez cultivares de feijão carioca (a) e preto (b) caracterizadas para adaptabilidade geral.

Na figura 3 são apresentadas as cultivares com desempenho apontado para cultivo em ambientes desfavoráveis. Esses tipos de ambientes apresentam índice ambiental negativo e podem ser descritos como de baixo investimento tecnológico, o que normalmente ocorre na agricultura de pequena escala. (CRUZ et al., 2012). Além disso, condições adversas ocasionadas pelo clima, como falta ou excesso de chuvas e incidência de pragas e doenças também contribuem para a caracterização de ambiente desfavorável. É esperado que essas cultivares mantenham um padrão satisfatório de produtividade, mesmo em situações de estresse, seja por falta ou excesso de algum fator. Entretanto, em situação de melhoria do ambiente, estas cultivares não são responsivas a este incremento ambiental. Isto ilustra a definição de adaptabilidade de Cruz et al. (2012), definida como a resposta diferencial das cultivares em função de um estímulo do ambiente.



a) carioca

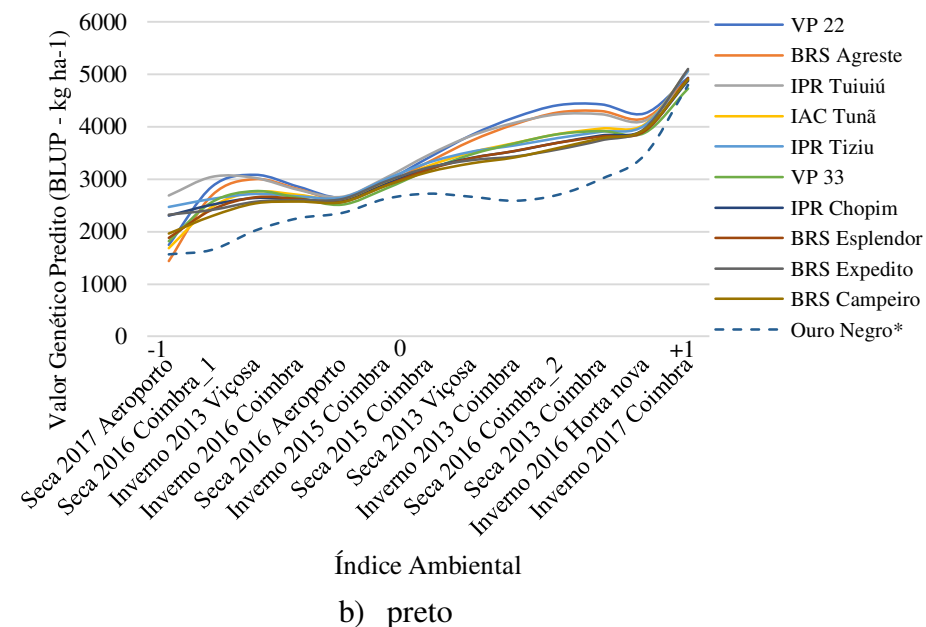
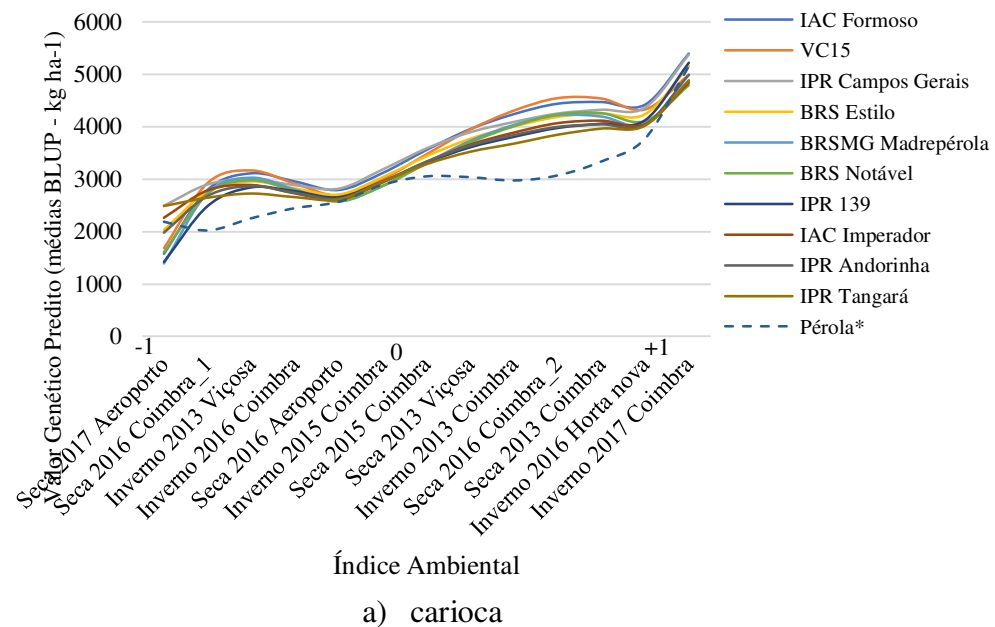


b) preto

*Cultivares usadas como testemunhas.

Figura 3. Normas de reação para a produtividade de grãos das dez cultivares de feijão carioca (a) e preto (b), caracterizadas para adaptabilidade específica a ambientes desfavoráveis.

Por fim, as cultivares com desempenho superior nos ambientes favoráveis são apresentadas na figura 4. Um ambiente favorável apresenta valores de gradiente ambiental positivo, indicando uma média superior à média geral. Estes ambientes são referidos com alto emprego tecnológico, como irrigação e agricultura de precisão, e comumente praticados por grandes produtores. Espera-se que cultivares adaptadas a esses locais normalmente apresentam satisfatória resposta à melhoria ambiental, alcançando elevados níveis de produtividade de forma a retornar o investimento realizado. Entretanto, em condições inferiores, como uma adversidade climática, tendem a apresentar uma baixa produção (CRUZ et al., 2012).



*Cultivares usadas como testemunhas.

Figura 4. Normas de reação para a produtividade de grãos das dez cultivares de feijão carioca (a) e preto (b), caracterizadas para adaptabilidade específica a ambientes favoráveis.

Na tabela 4 são apresentadas informações acerca das cultivares indicadas nas figuras 2, 3 e 4 acima. Ao todo, foram encontradas 25 cultivares de desempenho superior nos três tipos de cenários estudados, sendo 13 cultivares de feijão carioca e 12 de feijão preto, ocorrendo a repetição de algumas. Ao invés de 60 cultivares (20 por figura), houve algumas cultivares que foram selecionadas em mais de um cenário, como IPR Campos Gerais e IPR Tuiuiú, o que justifica a seleção de apenas 25.

Cultivares que foram selecionadas em dois ou três cenários indicam adaptabilidade ampla, além da elevada estabilidade. Estes resultados observados são esperados, uma vez que as cultivares são recomendadas em função da média de produtividade dos ensaios de VCU. Estes ensaios são a base para a recomendação de uma cultivar e tem a exigência serem realizados em vários locais, safras e anos de uma macrorregião em que se deseja recomendar a cultivar. Ademais, cultivares com ampla adaptação são de interesse aos agricultores, visto ao fato de o feijoeiro, em sua maioria, ser cultivado por pequenos agricultores, que tem o hábito de comprar grãos de outros produtores, até mesmo de outras regiões, para serem utilizadas como sementes. Assim, muitas vezes ocorre a sobreposição e descontrola da época e região de plantio à qual a cultivar foi recomendada (CARBONELL, 2001).

Pode-se observar que todas as cultivares tiveram notas de arquitetura e aspecto de grãos em torno de três, sendo próximas à média geral das cultivares apresentada na tabela 1. Verificou-se que, de forma geral, as cultivares de feijão preto apresentaram menores notas de arquitetura em relação as cultivares de feijão carioca. Assim, maior atenção deve ser dada a este caráter para as cultivares de feijão carioca, com vista a obtenção de plantas com porte ereto visando a colheita mecanizada.

É esperado que as demais variáveis avaliadas influenciem na produtividade das cultivares ao longo dos ambientes. Por exemplo, os experimentos avaliados que tiveram maior severidade de uma determinada doença, ocasionada pela influência do clima, por exemplo, irá comprometer a produção das plantas e conseqüentemente a produtividade das cultivares. Matos et al. (2007) mostraram em seu trabalho que, cultivares mais produtivas, ao longo de uma série de ambientes, são aquelas que contêm alelos favoráveis em seu genoma, proporcionando maior adaptação às condições de estresses abióticos e bióticos que ocorrem na cultura.

Para a característica produtividade de grãos, verificou-se que as cultivares tiveram médias fenotípicas gerais superiores a 3.000 kg ha⁻¹, com valores superiores a 4.000 kg ha⁻¹ nos ambientes favoráveis e valores elevados mesmo em condições adversas (ambientes

desfavoráveis). Estes valores também foram superiores as respectivas testemunhas, indicando a superioridade das cultivares.

A manutenção da produtividade frente a ambientes diversos é explicada em função da resposta ao estímulo ambiental, sendo causada pela expressão diferencial dos genes em cada indivíduo. Desta forma, a adaptabilidade e estabilidade indicada nas curvas de norma de reação das cultivares indica que elas tem a capacidade de detectar melhor as variações ambientais e expressar fenótipos que se ajustam melhor às condições ambientais (XUE e LEIBLER, 2018).

Observou-se que as linhagens VP 22 e VP 33 apresentaram desempenho superior nos ambientes classificados como favoráveis. Isto pode ser explicado pelo fato dos experimentos conduzidos pelos estudantes do Programa de Melhoramento do Feijoeiro da UFV, responsáveis pela seleção destas linhagens, serem sempre baseados em condições ótimas de cultivo (adubação, irrigação e controle de pragas e doenças).

Importante ressaltar que neste trabalho foram constatadas algumas cultivares com médias fenotípicas de produtividade elevadas, mas que não foram incluídas entre as selecionadas nas figuras 2, 3 e 4 pelos modelos de norma de reação. Isto pode ser explicado pelo fato da fórmula para o cálculo da probabilidade de cada cultivar, baseada na distância cultivar-ideótipo, penalizar cultivares que apresentaram grande variação de produtividade ao longo dos ambientes, mesmo tendo apresentado elevada média geral. Assim, modelos de norma de reação tem a capacidade de quantificar a estabilidade das cultivares, através da variância da produtividade ao longo dos ambientes (EEUWIJK et al., 2016; VAN OIJEN e HÖGLIND, 2016).

Verificou-se que as cultivares que se mostraram superiores conforme os dados apresentados na tabela 4 são materiais recomendados nos últimos anos (após 2003). Esses resultados permitem concluir que os programas de melhoramento do feijoeiro têm dado importância à interação GxA na recomendação de cultivares e, conseqüentemente, obtido êxito em desenvolver novas cultivares adaptadas as diversas condições de cultivo, com produtividade superior de grãos. É importante ressaltar que a eficiência dos programas de melhoramento do feijoeiro no Brasil é principalmente devido ao trabalho de instituições públicas de pesquisa (COELHO et al., 2017).

Por fim, verificou-se que as cultivares superiores em cada cenário estudado foram provenientes de diferentes programas de melhoramento, sendo elas desenvolvidas por quatro instituições (EMBRAPA, UFV, IAC E IAPAR). Isto é indicativo de provável divergência

genética entre as cultivares, uma vez que os programas de melhoramento são independentes, contendo seus próprios conjuntos de genitores. Possobom (2018) mostrou em seu trabalho que as cultivares originadas de uma mesma instituição normalmente são mais aparentadas, enquanto cultivares oriundas de diferentes instituições pertence a grupos de dissimilaridade diferentes.

Os resultados obtidos neste trabalho fornecem subsídios para a escolha de genitores para continuidade dos programas de melhoramento do feijoeiro. Ramalho et al. (2012) afirma que para que as cultivares sejam incluídas em um programa de melhoramento, é necessária a escolha acertada dos genitores, visto que o sucesso das etapas subsequentes é dependente da eficácia desta escolha. Uma apropriada alternativa é a inclusão dessas cultivares em cruzamentos dialélicos, visando o auxílio na seleção de genitores com fenótipos favoráveis e originários de grupos distintos de dissimilaridade (VALE et al., 2015).

Tabela 4: Notas de arquitetura de plantas (ARQ) e aspecto de grão (AG), média de produtividade de grãos geral (GERAL), apenas nos ambientes favoráveis (FAV) e nos desfavoráveis (DESF) e ano de recomendação das cultivares de feijão carioca e preto, considerando a classificação pelos modelos de norma de reação.

		NOTAS								
Tipo	Cultivares	ARQ	NG	ANT	FER	MAN	GERAL	FAV	DESF	ANO
Carioca	BRS Pontal	3.8	2.8	1 ^a	1a	2 ^a	3199	3540a	2801	2004
	IAC-Apuã	3.2a	3.5	1 ^a	1.5a	2.2 ^a	3001a	3541a	2371a	2005
	IPR 139	2.8	2.1	1.2a	1a	3.0	3179	3856	2389a	2007
	IAC Alvorada	3.3a	2.0	1 ^a	1.1a	4.5	3057a	3692	2317a	2007
	IPR Tangará	2.9a	2.1	1 ^a	1a	3.0	3186	3745	2534	2008
	BRS Estilo	2.9a	2.5a	1.2a	1.2a	2.7 ^a	3377	4065	2574	2009
	IPR Campos Gerais	2.7	2.5a	1 ^a	1.2a	2.8	3649	4209	2995	2011
	IAC Formoso	3.5	2.3a	1 ^a	1.3a	3.3	3471	4266	2543	2011
	BRS Notável	2.8	3.0	1 ^a	1.1a	3.2	3249	3934	2451a	2011
	BRSMG Madrepérola	3.5	1.0	1.1a	1a	4.8	3063a	3682	2342a	2012
	IPR Andorinha	3.3a	2.6a	1 ^a	1.1a	6.0	3294	3806	2697	2013
	IAC Imperador	3.2a	2.5a	1 ^a	1.3a	5.3	3262	3904	2513	2013
	VC15	3.5	1.8	1 ^a	1a	2.7 ^a	3352	4040	2548	2013
Test	Pérola*	3.1a**	2.4a	1 ^a	1.2a	2.1 ^a	2906a	3449a	2273a	1994
Preto	BRS Campeiro	2.7	2.2	1.3	1.3a	3.5	3153	3697	2517	2003
	BRS Grafite	2.8	1.7a	1.5	1.6a	3.5	3038	3501	2498	2003
	IPR Chopin	2.5	2.7	1.0	1.6a	4.0	3273	3950	2732	2004
	IAC Tunã	3.2	2.0	1.0	1.2a	3 ^a	3250	3867	2530	2005
	BRS Esplendor	2.4	2.6a	1.0	1.2a	2.8 ^a	3146	3764	2424	2006
	IPR Tiziu	2.4	2.1	1.0	1.1a	2.7 ^a	3375	3898	2764	2006
	BRS Expedito	2.3	2.1a	1.0	1a	2.7 ^a	3194	3716	2586	2007
	IPR Gralha	2.8	2.8a	1.0	1a	2.5 ^a	3111	3594	2547	2007
	BRS Agreste	2.4	2.6	1.3	1a	3.5	3335	4217	2629	2009
	IPR Tuiuiú	2.5	2.0	1.0	1a	2.8 ^a	3376	3907	2757	2010
	VP 33	3.5	2.8	1.0	1.1a	2.7 ^a	3059	3538	2500	2013
	VP 22	2.6	1.7	1.0	1a	3 ^a	3330	4243	2266	2013
	Test	Ouro Negro*	4.2a	2.2a	5.4a	1a	2.7 ^a	2510a	3014a	1922a

*testemunhas de feijão carioca e preto, respectivamente; **médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de médias de Dunnet a 5% de probabilidade.

5. CONCLUSÕES

A utilização de modelos de norma de reação por meio da metodologia de modelos mistos mostrou-se eficaz na avaliação da adaptabilidade e estabilidade genotípica de cultivares de feijão em experimentos com desbalanceamento genético e estatístico.

Doze cultivares de feijão preto (BRS Campeiro, BRS Grafite, IPR Chopim, IAC Tunã, BRS Esplendor, IPR Tiziu, BRS Expedito, IPR Galha, BRS Agreste, IPR Tuiuiu, VP 33 e VP 22) e treze de feijão carioca (BRS Pontal, IAC Apuã, IPR 139, IAC Alvorada, IPR Tangará, BRS Estilo, IPR Campos Gerais, IAC Formoso, BRS Notável, BRSMG Madrepérola, IPR Andorinha, IAC Imperador e VC 15) foram identificadas como potenciais genitores para uso nos programas de melhoramento do feijoeiro. Estas cultivares apresentaram excelente desempenho nos diferentes cenários avaliados, sugerindo alta concentração de alelos favoráveis em seu genoma, o que pode proporcionar maiores ganhos com o melhoramento devido à complementariedade genética.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Â. DE F. B. et al. Progresso do melhoramento genético do feijoeiro nas décadas de setenta e oitenta nas regiões sul e Alto Paranaíba em Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n. 1, p. 01-91, jan. 1994.

ALLARD, R. W.; BRADSHAW, A. D. Implications of genotype-environmental interactions in applied plant breeding1. **Crop Science**, v. 4, n. 5, p. 503, sep. 1964.

AMARO, G. B. et al. Phenotypic recurrent selection in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) with carioca-type grains for resistance to the fungi *Phaeoisariopsis griseola*. **Genetics and Molecular Biology**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 584–588, 2007.

BARILI, L. D. et al. Adaptabilidade e estabilidade e a produtividade de grãos em cultivares de feijão preto recomendadas no Brasil nas últimas cinco décadas. **Ciência Rural**, v. 45, n. 11, p. 1980–1986, 2015.

BERTOLDO, J. G. et al. Stratification of the state of Santa Catarina in macroenvironments for bean cultivation. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 9, n. 4, p. 335–343, 2009.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. **Melhoramento de Plantas**. 6. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2013. 523 p.

BRASIL. Lei no 9.456 de 25 de abril de 1997. Institui a Lei de Proteção de Cultivares e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, 25 de abril de 1997 Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

BURGUEÑO, J. et al. Genomic prediction of breeding values when modeling genotype × environment interaction using pedigree and dense molecular markers. **Crop Science**, v. 52, n. 2, p. 707-719, mar. 2012.

CAMPOS A., J.; FUCIKOVSKY ZAK, L. Study of some characteristics of *Isariopsis griseola* Sacc., the agent which causes angular leaf spot of French bean. **Agrociência**, v. 39, n. 23, p. 41–48, 1980.

CARBONELL, S. A. M. et al. Tamanho de grão comercial em cultivares de feijoeiro. **Ciência Rural**, v. 40, n. 10, p. 2067–2073, out. 2010.

CARBONELL, S. A. M. et al. Adaptabilidade e estabilidade de produção de cultivares e linhagens de feijoeiro no Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 60, n. 2, p. 69–77, 2001.

CARBONELL, S. A. M. et al. Estabilidade de cultivares e linhagens de feijoeiro em diferentes ambientes no Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 66, n. 2, p. 193–201, nov. 2007.

CARBONELL, S. A. M.; POMPEU, A. S. Estratificação de ambientes em experimentos de feijoeiro no estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 56, n. 1, p. 207–218, 1997.

CARGNELUTTI FILHO, A.; STORCK, L. Medidas do grau de precisão experimental em ensaios de competição de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 2, p. 111–117, nov. 2010.

CARGNIN, A. et al. Interação entre genótipos e ambientes e implicações em ganhos com seleção em trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 6, p. 987–993, jun. 2006.

CARGNIN, A.; SOUZA, M. A.; FOGAÇA, C. M. Comparação de métodos de análise de adaptabilidade e estabilidade em trigo. **Revista Ceres**, v. 55, n. 4, p. 243–250, jun. 2008.

CARNEIRO, J. E. S.; PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. **Feijão: do plantio à colheita**. 1ª ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2015. p. 384.

CELLON, C. et al. Estimation of genetic parameters and prediction of breeding values in an autotetraploid blueberry breeding population with extensive pedigree data. **Euphytica**, v. 214, n. 87, apr. 2018.

CHIORATO, A. F. et al. Genetic gain in the breeding program of common beans at IAC from 1989 to 2007. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 10, n. 4, p. 329–336, dec. 2010.

COCKERHAM, C. C. Estimating genetic variance. In: HANSON, W. D.; ROBINSON, H. (Eds.). **Statistical genetics and plant breeding**. Publ. 982. Danvers, MA: National Academy of Sciences-National Research Council. 1963. p. 53–93.

COELHO, C. G.; OLIVEIRA, L. DOS S. G.; BERNARDES, L. **Melhoramento do feijoeiro no Brasil: uma revisão de literatura**. In: XXI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e

VII Encontro de Iniciação à Docência – Universidade do Vale do Paraíba. São José dos Campos. **Anais INICEPG**. Dez. 2017. p. 1-4.

COLLICCHIO, E.; RAMALHO, M. A. P.; ABREU, Â. D. F. B. Associação entre o porte da planta do feijoeiro e o tamanho dos grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 3, p. 297–304, mar. 1997.

CONAB: Importação/exportação por país. In: Conab - Comércio Exterior - por País. In: **CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/index.php/comercio-exterior-por-pais>. Acesso em: 18 mar. 2019.

CONAB: Série histórica de safras. In: **CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em 18 nov. 2018.

CRUZ, C. D. Programa GENES: Aplicativo computacional em estatística aplicada à genética (GENES - Software for Experimental Statistics in Genetics). **Genetics and Molecular Biology**, v. 21, n. 1, p. 135–138, mar. 1998. 42

CRUZ, C. D.; CASTOLDI, F. L. Decomposição da interação genótipos x ambientes em parte simples e parte complexa. **Revista Ceres**, v. 38, n. 219, p. 422-430, mar. 1991.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2012. p. 514.

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

DEMPSTER, A. P.; LAIRD, N. M.; RUBIN, D. B. Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, v. 39, n. 1, p. 1–38, 1977.

DEWITT, T. J.; SCHEINER, S. M. **Phenotypic plasticity: functional and conceptual approaches**. 1. ed. Oxford, UK: Oxford University Press, 2004. p. 272.

DOS ANJOS, R. S. R. et al. New proposals to estimate unbiased selection gain and coefficient of variation in traits evaluated using score scales. *Crop Science*, v. 59, p. 1–8, may 2019.

EBERHART, S. A.; RUSSELL, W. A. Stability parameters for comparing varieties. **Crop Science**, v. 6, n. 1, p. 36, may. 1966.

EEUWIJK, F. A. VAN; BUSTOS-KORTS, D. V.; MALOSETTI, M. What should students in plant breeding know about the statistical aspects of genotype environment interactions? **Crop Science**, v. 56, n. 5, p. 2119–2140, aug. 2016.

EPAMIG. **Inovações tecnológicas para a produção de feijão**. Informe Agropecuário, v. 38, n. 298, 2017. p. 1–100.

FEIJÃO. In: Câmaras setoriais. **MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/camaras-setoriais-1/feijao>. Acesso em: 20 out. 2018.

FINLAY, K.; WILKINSON, G. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 14, n. 6, p. 742, jan. 1963.

FISHER, R. A. The correlation between Relatives on the Supposition of Mendelian Inheritance. **Transactions of the Royal Society of Edinburgh**, v. 52, p. 399–433, 1918.

Formulários para Registro de Cultivares. In: **MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/sementes-e-mudas/registro-nacional-de-cultivares-2013-rnc-1/formularios-para-registro-de-cultivares>. Acesso em: 10 jan. 2019.

FREITAS, I. L. J. et al. Ganho genético avaliado com índices de seleção e com REML/Blup em milho-pipoca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 11, p. 1464–1471, fev. 2014.

Gilmour AR, et al. ASReml user guide release 4.1 structural specification, **VSN International Ltd**, Hemel Hempstead, UK; 2015. Disponível em: <www.vsni.co.uk>. Acesso em: 27 nov. 2018 43

GRASER, H. U.; SMITH, S. P.; TIER, B. A derivative free approach for estimating variance components in animal models by restricted maximum likelihood. **Journal of Animal Science**, v. 64, p. 1362–1370, 1987.

HARTLEY, H. O.; RAO, J. N. K. Maximum-likelihood estimation for the mixed analysis of variance model. **Biometrika**, v. 54, n. 1–2, p. 93–108, jun. 1967.

HENDERSON, C.R. **Applications of linear models in animal breeding**. 1 ed. University of Guelph, Guelph, 1984. 462 p.

JARQUÍN, D. et al. A reaction norm model for genomic selection using high-dimensional genomic and environmental data. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 127, n. 3, p. 595–607, mar. 2014.

KIRKPATRICK, M.; LOFSVOLD, D.; BULMER, M. Analysis of the inheritance, selection and evolution of growth trajectories. **Genetics**, v. 124, n. 4, p. 979–993, apr. 1990.

LIAN, L. et al. Genomewide prediction accuracy within 969 maize biparental populations. **Crop Science**, v. 54, p. 1514–1522, jul-aug. 2014.

LIN, C. S. Grouping genotypes by a cluster method directly related to genotype-environment interaction mean square. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 62, n. 3, p. 277–280, sep. 1982.

LIN, C. S.; BINNS, M. R. A superiority measure of cultivar performance for cultivar × location data. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 68, n. 1, p. 193–198, jan. 1988.

LORENZANA, R. E.; BERNARDO, R. Accuracy of genotypic value predictions for marker-based selection in biparental plant populations. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 120, n. 1, p. 151–161, dez. 2009.

Proteção de Cultivares. In: **MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/protECAo-de-cultivar/protECAo-de-cultivares>>. Acesso em: 23 jan. 2019.

MARCELINO, S. D. R.; IEMMA, A. F. Métodos de estimação de componentes de variância em modelos mistos desbalanceados. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 4, p. 643–652, out-dez. 2000.

MATOS, J. W. de; RAMALHO, M. A. P.; ABREU, Â. DE F. B. Trinta e dois anos do programa de melhoramento genético do feijoeiro comum em Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 6, p. 1749–1754, nov-dez. 2007.

MELO, C. L. P. de, et al. Linhagens de feijão do cruzamento —Ouro Negro1 x —Pérola1 com características agrônômicas favoráveis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 11, p. 1593–1598, nov. 2006.

MELO, L. C. et al. Interação com ambientes e estabilidade de genótipos de feijoeiro-comum na Região Centro-Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n. 1, p. 715–723, mai. 2007. 44

MOURA, M. M. et al. Potencial de caracteres na avaliação da arquitetura de plantas de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 4, p. 417–425, abr. 2013.

MURAKAMI, D. M.; DAMIÃO CRUZ, C. Proposal of methodologies for environment stratification and analysis of genotype adaptability. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 4, p. 7–11, 2004.

NETO, A. R. et al. Comportamento de genótipos de arroz de terras altas no estado de São Paulo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 3, p. 512–519, abr. 2013.

OAKEY, H. et al. Joint modeling of additive and non-additive genetic line effects in single field trials. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 113, n. 5, p. 809–819, set. 2006.

OLIVEIRA, A. B. DE; DUARTE, J. B.; PINHEIRO, J. B. Emprego da análise AMMI na avaliação da estabilidade produtiva em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 3, p. 357–364, mar 2003.

OLIVEIRA, G. V. DE et al. Factor analysis in the environment stratification for the evaluation of common bean cultivars. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 5, p. 166–173, may. 2005.

PASTOR-CORRALES, M.A. Recomendaciones y acuerdos del primer taller de antracnosis en América Latina. In: Pastor-Corrales, M.A. (Ed.) **La Antracnosis del Frijol Común, Phaseolus vulgaris, en América Latina**. Cali, Colômbia. CIAT. 1992. pp. 240-250.

PATTERSON, H. D.; THOMPSON, R. Recovery of inter-block information when block sizes are unequal. **Biometrika**, v. 58, n. 3, p. 545–554, dec. 1971.

PAULA JÚNIOR, T. J. et al. **Cultivares de feijão-comum para Minas Gerais**. Viçosa, MG: EPAMIG, 2010.

PEREIRA, H. S. et al. e estabilidade fenotípica em feijoeiro-comum. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n. 1, p. 374–383, 2009.

PEREIRA, H. S. et al. Estratificação ambiental na avaliação de genótipos de feijoeiro-comum tipo Carioca em Goiás e no Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 6, p. 554–562, jun. 2010.

PÉREZ-RODRÍGUEZ, P. et al. A pedigree-based reaction norm model for prediction of cotton yield in multi-environment trials. **Crop Science**, v. 55, n. 3, p. 1143, dec. 2015.

PIEPHO, H. P. et al. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. **Euphytica**, v. 161, n. 1–2, p. 209–228, may. 2008.

PINHEIRO, L. C. DE M. et al. Parentesco na seleção para produtividade e teores de óleo e proteína em soja via modelos mistos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 9, p. 1246–1253, dez. 2013.

PLAISTED, R. L.; PETERSON, L. C. A technique for evaluating the ability of selections to yield consistently in different locations or seasons. **American Potato Journal**, v. 36, n. 11, p. 381–385, nov. 1959.

POSSOBOM, M. T. D. F. **Diversidade genética de linhagens de feijão preto e “carioca” recomendadas no Brasil nos últimos 50 anos**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2018. 105 p.

R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**. Austria, Vienna, 2015. Disponível em: <http://www.R-project.org/>.

RAMALHO, M. A. P. et al. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. 1. ed. Lavras, MG: UFLA, 2012. 522 p.

RAMALHO, M. A. P.; ABREU, Â. DE F. B.; CARNEIRO, J. E. DE S. **Cultivares**. Informe Agropecuário, v. 25, n. 223, p. 21–32, 2004.

RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. DE F. B.; SANTOS, P. S. J. DOS. Interações genótipos x épocas de semeadura, anos e locais na avaliação de cultivares de feijão nas regiões Sul e Alto Paranaíba em Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 22, n. 2, p. 175–181, abr-jun. 1998.

RAMALHO, M. A. P.; DIAS, L. A. DOS S.; CARVALHO, B. L. Contributions of plant breeding in Brazil: progress and perspectives. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 12, n. spe, p. 111–120, dec. 2012.

RAMALHO, M. A. P.; PIROLA, L. H.; ABREU, Â. F. B. Alternativas na seleção de plantas de feijoeiro com porte ereto e grão tipo carioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 12, p. 1989–1994, dez. 1998.

RAO, C. R. **Linear statistical inference and its application**. New York: John Wiley and Sons, 1965. 390 p.

RAO, C. R. Minimum Variance Quadratic Unbiased Estimation of Variance Components. **Journal of multivariate analyses**, v. 1, n. 4, p. 445–456, feb. 1971a.

RAO, C. R. Estimation of variance and covariance components—MINQUE theory. **Journal of Multivariate Analysis**, v. 1, n. 3, p. 257–275, set. 1971b.

RESENDE, M. D. V. de. Análise estatística de modelos mistos via REML/BLUP na experimentação em melhoramento de plantas perenes. **Embrapa Florestas-Documents** (INFOTECA-E), 2000. M. D. V. DE.

RESENDE, M. D. V. de. SELEGEN-REML/BLUP Sistema Estatístico e Seleção Genética Computadorizada via Modelos Lineares Mistos. Colombo, PR: **Embrapa Florestas-Documents**, 2007.

RESENDE, M. D. V. de; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 3, p. 182–194, set. 2007. 46

RESENDE, M. D. V. de **Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica: Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 975 p.

RIBEIRO COSTA, J. et al. Análise espacial e de vizinhança no melhoramento genético de plantas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 11, p. 1073–1079, nov. 2005.

RIBEIRO, N. D. et al. Adaptação e estabilidade de produção de cultivares e linhagens-elite de feijão no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 38, n. 9, p. 2434–2440, dez. 2008.

SARTORATO, A. Antracnose. In: ZIMMERMANN, M. J. O.; ROCHA, Y.; YAMADA, T. (Eds.). **Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Potafos, 1988. p. 457-477.

SEARLE, S. R. **Linear Models for unbalanced data**. New York: John Wiley and Sons, 1987. 536 p.

SEARLE, S. R.; CASELLA, G.; MCCULLOCH, C. E. **Variance components**. New York: John Wiley and Sons, 1992. 501 p.

SILVA, G. A. et al. Análise da adaptabilidade e estabilidade de produção em ensaios regionais de feijoeiro para o Estado de São Paulo. **Revista Ceres**, v. 60, n. 1, p. 59–65, jan-fev. 2013.

SILVA, O. F.; WANDER, A. E. **O feijão-comum no Brasil: passado, presente e futuro**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2013. 63 p.

SMITH, A. B.; CULLIS, B. R.; THOMPSON, R. The analysis of crop cultivar breeding and evaluation trials : an overview of current mixed model approaches. **Journal of Agricultural Science**, v. 143, p. 449–462, dec. 2005.

SMITH, A.; CULLIS, B.; GILMOUR, A. The Analysis of Crop Variety Evaluation Data in Australia. **New Zealand Journal of Statistics**, v. 43, n. 2, p. 129–145, jun. 2001.

STAVELEY, J. R., FREYTAG, G.F., STEADMAN, J.R., SCHWARTZ, H. . **The 1983 Bean Rust Workshop**. Annual Report of the Bean Improvement Cooperative. **Anais**, 1983

VALE, N. M. DO et al. Escolha de genitores quanto à precocidade e produtividade de feijão tipo carioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 2, p. 141–148, fev. 2015.

VALE, F. X. R.; ZAMBOLIM, L. Influência da temperatura e da umidade nas epidemias de doenças de plantas. **Revisão anual de patologia de plantas**, Viçosa - MG, v. 4, p. 149–207, 1996.

VAN OIJEN, M.; HÖGLIND, M. Toward a Bayesian procedure for using process-based models in plant breeding, with application to ideotype design. **Euphytica**, v. 207, n. 3, p. 627–643, feb. 2016.

VERMA, M. M.; CHAHAL, G. S.; MURTY, B. R. Limitations of conventional regression analysis a proposed modification. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 53, n. 2, p. 89–91, sep. 1978.

VIEIRA, C. et al. Melhoramento do feijão. In: **Melhoramento de espécies cultivadas**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2005.

WOLFINGER, R. Covariance structure selection in general mixed models. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**, v. 22, n. 4, p. 1079–1106, jan. 1993.

WOLTERECK, R. Weitere experimentelle Untersuchungen über Artveränderung, speziell über das Wesen quantitativer Artunterschiede bei Daphnien. **Verhandlungen der Dtsch**, v. 19, p. 110–173, 1909.

WRICKE, G. Zur Berechnung der Ökovalenz bei Sommerweizen und Hafer. **Pflanzenzuchtung**, v. 52, p. 127–138, 1965.

XUE, B.; LEIBLER, S. Benefits of phenotypic plasticity for population growth in varying environments. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 115, n. 50, p. 12745–12750, dec. 2018.

YAN, W. et al. Cultivar Evaluation and Mega-Environment Investigation Based on the GGE Biplot. **Crop Science**, v. 40, n. 3, p. 597, 2000.