



**CONSTANTINO RICO RAIMUNDO ARTUR**

**ESTRATÉGIA FUZZY APLICADA A SELEÇÃO DE  
LINHAGENS DE FEJOEIRO**

**LAVRAS-MG  
2024**

**CONSTANTINO RICO RAIMUNDO ARTUR**

**ESTRATÉGIA FUZZY APLICADA A SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEJOEIRO**

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

Prof. Dr. Vinícius Quintão Carneiro  
Orientador

Prof. Dr. Tiago de Souza Marçal  
Co-Orientador

**LAVRAS-MG  
2024**

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

Artur, Constantino Rico Raimundo.

Estratégia fuzzy aplicada a seleção de linhagens  
de fejeiro / Constantino Rico Raimundo Artur. -  
2024.

71 p. : il.

Orientador(a): Vinícius Quintão Carneiro.

Coorientador(a): Tiago de Souza Marçal.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade  
Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Phaseolus vulgaris L. 2. melhoramento  
genético. 3. inteligência computacional. I. Carneiro,  
Vinícius Quintão. II. Marçal, Tiago de Souza. III.  
Título.

**CONSTANTINO RICO RAIMUNDO ARTUR**

**ESTRATÉGIA FUZZY APLICADA A SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEJOEIRO**

**FUZZY STRATEGY APPLIED TO THE SELECTION OF BEAN LINES**

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

APROVADO em 31 de julho de 2024  
Dr. Vinícius Quintão Carneiro UFLA  
Dr. Tiago de Souza Marçal UFLA  
Dr. Magno Antônio Patto Ramalho UFLA  
Dr. Cosme Damião Cruz UFV

Prof. Dr. Vinícius Quintão Carneiro  
Orientador

Prof. Dr. Tiago de Souza Marçal  
Co-Orientador

**LAVRAS-MG  
2024**

A Deus,  
OFEREÇO

*A minha avó, Maria Chiquebo, que a sua alma descanse em paz!*

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conduzir durante todo o percurso do mestrado, o caminho não foi fácil, mas Deus sempre esteve comigo.

À minha mãe, Maria Rosa Raimundo Artur, por apoiar e incentivar minhas escolhas acadêmicas, pelo carinho, amor e cuidado em todos os momentos. Pela torcida constante e incansável e por não medir esforços para oferecer o necessário para que eu seguisse meus sonhos.

Aos meus irmãos, João, Antônio, Raimundo, Salvador e Martinho pela torcida mesmo estando distante de mim, amo vocês manos!

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Vinícius Quintão Carneiro pelos valiosos ensinamentos, incansável paciência, disponibilidade, e por ter oferecido um lugar seguro e amigável para que eu seguisse com meus objetivos como estudante, assim como o meu bem-estar pessoal, tendo contribuído bastante para a elaboração deste trabalho e para minha formação acadêmica e profissional.

Agradeço ao meu co-orientador Prof. Dr. Tiago de Souza Marçal pela coorientação, pelos ensinamentos e dicas da vida profissional, disponibilidade, incansável paciência durante a elaboração desta dissertação e pelos conhecimentos transmitidos, que foram essenciais para a concretização deste trabalho e para minha formação acadêmica e profissional.

Ao professor Magno Antonio Patto Ramalho, pelas contribuições dadas para a melhoria da redação deste trabalho, assim como pelas contribuições dadas pelos manuais utilizados durante a minha formação.

Ao professor Cosme Damião Cruz, pelas contribuições dadas para a melhoria da redação deste trabalho, assim como pelas contribuições dadas pelos manuais utilizados durante a minha formação.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas (PPGGM) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), representado pelo coordenador Dr. José Airton Rodrigues Nunes por todos os conhecimentos transmitidos durante a minha formação e por toda atenção e cuidado que têm com os alunos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio

Agradeço a todos os colegas do programa de melhoramento de feijão da UFLA. Aos que passaram pelo programa: Rafaela, Miguel, Júlio, Domingos, Dique, Andreza, Danilo, João, João Vitor, Bruno, Guilherme, Matheus e Edésio, e Léo. Cada um de vocês foi fundamental durante esta jornada. Agradeço pela convivência harmoniosa e por tornarem nosso ambiente de trabalho mais alegre e divertido.

Agradeço ao João e a Ana pela hospitalidade, e por criarem um ambiente seguro saudável e habitável para mim durante a minha formação.

Aos meus amigos com quem compartilhei os momentos dessa caminhada Bruno, Dique por sua dedicação, sabedoria, animação e coragem que compartilharam comigo durante as atividades de campo, e aos demais amigos que ocupam muitos nomes e, para não correr o risco de esquecer algum, não citarei, mas tenho certeza que sabem o quanto foram importantes.

Por fim, a todos os que torceram por mim direta ou indiretamente. Muito obrigado!

*Everything you are seeking is seeking you in return therefore, everything that you want is already yours. It is simply becoming more aware of what you already possess. ” – **Bob Proctor-***

## RESUMO

O feijão do grupo comercial preto é o segundo mais produzido no Brasil. Este é consumido principalmente na região Sul do País e nos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Devido a sua importância nacional, os programas de melhoramento do feijoeiro têm se dedicado ao desenvolvimento de linhagens altamente produtivas, resistentes aos principais patógenos que afetam a cultura, com plantas com arquitetura ereta e, especialmente, com grãos de elevada qualidade comercial. A obtenção dessas linhagens não é tarefa simples, uma vez que estes caracteres possuem natureza quantitativa. Para alcançar sucesso, é necessário que estes genótipos sejam extensivamente avaliados quanto aos principais caracteres agrônômicos em experimentos conduzidos em diferentes condições ambientais. A seleção visando multicares e multiambiente é um desafio devido a correlação desfavorável entre os caracteres e também devido a interação genótipos por ambientes. Metodologias inovadoras como os controladores fuzzy, que se baseiam no emprego do conhecimento de especialistas para desenvolver sistemas de tomada de decisão, podem auxiliar na seleção de linhagens em programas de melhoramento. Portanto, objetivo deste trabalho foi empregar um controlador fuzzy para auxiliar na seleção de linhagens de feijão preto com elevado potencial produtivo e qualidade comercial de grãos. Um conjunto de 162 linhagens e sete testemunhas de feijão preto foram avaliadas quanto a produtividade e aspecto comercial dos grãos em dois experimentos conduzidos nas safras das águas de 2022 e seca de 2023. Foram realizadas análises individuais e conjunta de variância/deviance para ambos os caracteres. Também foi desenvolvido um controlador Fuzzy para auxiliar na seleção das linhagens quanto a produtividade e aspecto dos grãos. Este controlador considerou a seleção simultânea sob condição de interação genótipos por ambientes, que foi observada para ambos os caracteres. Por meio desta metodologia foram selecionadas 16 linhagens de feijão preto com elevado potencial produtivo e qualidade comercial dos grãos.

**Palavras chave:** *Phaseolus vulgaris* L.; melhoramento genético; inteligência computacional.

## ABSTRACT

Common beans from the black commercial group are the second most produced in Brazil. It is consumed mainly in the southern region of the country and the states of Rio de Janeiro and Espírito Santo. Due to its national importance, bean breeding programs have been dedicated to developing highly productive lines, resistant to the main pathogens that affect the crop, plants with upright architecture, and, especially, with grains of high commercial quality. Providing these lines is not a simple task, since these characters are quantitative. To achieve success, these genotypes must be extensively evaluated for the main agronomic characters in experiments under different environmental conditions. Multi-trait and multi-environment selection are challenging due to the negative correlation between traits and genotype-by-environment interaction. Innovative methodologies such as fuzzy logic, which is based on the knowledge of the specialists to develop decision-making systems, can assist in the selection of lines in breeding programs. Therefore, the objective of this work was to employ a fuzzy controller to assist in the selection of black bean lines with high productive potential and commercial grain quality. A total of 162 black bean lines and seven controls were evaluated for the productivity and commercial aspect of the grains in two experiments scheduled in the 2022 rainy and dry 2023 seasons. Individual and joint analyses of variance/deviance were carried out for both traits. A Fuzzy controller was also developed to assist in selecting strains regarding grain productivity and appearance. This controller is currently simultaneous selection under genotype by environment interaction, which was observed for both traits. Using this methodology, 16 lines of black beans were selected with high productivity potential and commercial grain quality.

**Key words:** *Phaseolus vulgaris* L.; genetics and plant breeding; computational intelligence.

## INDICADORES DE IMPACTO

A seleção de linhagens do feijoeiro com elevado potencial produtivo e aspecto comercial de grãos na ótica de multi-ambientes e multi-carater é crucial para entender o comportamento e maximizar sua produtividade nas diferentes regiões produtoras desta cultura no Brasil. Esta pesquisa visa selecionar linhagens de feijoeiro comum na ótica de multi-ambientes e multi-carater, buscando identificar linhagens com desempenho igual ou superior a cultivares disponíveis no mercado. O estudo se enquadra na sétima área temática da Política Nacional de Extensão, "Tecnologia e produção", pois busca entender o desempenho de linhagens do feijoeiro em uma importante área produtora, utilizando técnicas de inteligência artificial, na mesorregião do Campos das Vertentes. Além disso, conecta-se ao oitavo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da ONU, "trabalho decente e crescimento econômico", promovendo o crescimento econômico sustentável ao oferecer emprego para produtores e impulsionar o uso de técnicas de inteligência artificial no setor agrícola da mesorregião do Campos das Vertentes. Os grupos populacionais impactados são os produtores de feijão na mesorregião do Campos das Vertentes do Brasil. O estudo beneficia diretamente esses produtores, bem como instituições de melhoramento genético e grandes empresas produtoras de feijoeiro. O caráter extensionista desta pesquisa é evidente, pois envolve parcerias com produtores, empresas e instituições do setor agrícola. O conhecimento gerado é compartilhado com a sociedade externa à UFLA, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da região e fornecendo soluções para os desafios enfrentados pelos produtores de feijão. A pesquisa sobre estratégia fuzzy aplicada a seleção de linhagens de feijoeiro não só fornece entendimento para os produtores e empresas do setor agrícola das novas estratégias de seleção acurada de linhagens, mas também contribui para a automação de tarefas no processo de produção da cultura, flexibilizando as tarefas e contribuindo para o crescimento econômico regional. Ao alinhar-se com os Objetivos de Desenvolvimento sustentável da ONU, esta pesquisa demonstra impacto positivo e direto que a ciência pode contribuir na promoção de um futuro mais sustentável e próspero.

## **INDICATORS IMPACTS**

The selection of bean lines with high productive potential and commercial grain aspect from a multi-environment and multi-character perspective is crucial to understanding the behavior and maximizing its productivity in the different producing regions in Brazil. This research aimed to select common bean lines from a multi-environment and multi-character perspective, seeking to identify lines with performance equal to or superior to cultivars available on the market. The study falls within the seventh thematic area of the National Extension Policy, "Technology and production", as it seeks to understand the performance of bean lines in an important producing area, using artificial intelligence techniques, in the Campos das Vertentes mesoregion. Furthermore, it connects to the UN's eighth Sustainable Development Goal, "Decent work and economic growth", promoting sustainable economic growth by offering employment to producers and boosting the use of artificial intelligence techniques in the agricultural sector. The impacted population groups are bean producers in the Campos das Vertentes mesoregion of Brazil. The study directly benefits these producers, as well as genetic and plant breeding institutions. The extension nature of this research is evident, as it involves partnerships with producers, companies and institutions in the agricultural sector. The knowledge generated is shared with society outside UFLA, contributing to the sustainable development of the region and providing solutions to the challenges faced by bean producers. Research on fuzzy strategy applied to the selection of bean strains not only provides understanding to producers and companies in the agricultural sector of new strategies for accurate strain selection, but also contributes to the automation of tasks in the crop production process, making it more flexible tasks and contributing to regional economic growth. By aligning with the UN Sustainable Development Goals, this research demonstrates the positive and direct impact that science can contribute to promoting a more sustainable and prosperous future.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Gráfico das funções de pertinência forma Z e S (a), forma de $\pi$ (b), triangulares (c) e trapezoidal (d) .....	25
<b>Figura 2</b> - Estrutura de sistema de tomada de decisão fuzzy.....	28
<b>Figura 3</b> - Variável Fuzzy utilizadas no sistema de inferência Mandani (A), e de sistema de inferência Sugeno (B) .....	29
<b>Figura 4</b> - Diferentes métodos de defuzzificação.....	32
<b>Figura 5</b> - Grupos de médias inferiores (MINT), iguais (MIGT) e superiores (MSUT) à testemunha BRS FC403 das variáveis fuzzy de entrada produtividade de grãos (PG) e aspecto de grãos (AG) .....	55
<b>Figura 6</b> - Grupos de genótipos não selecionados (GNS), intermediários (GINT), ótimos (GOT) e ideais (GID) da variável de saída denominada Índice do controlador fuzzy.....	56
<b>Figura 7</b> - Dispersão das médias das linhagens quanto a produtividade (A) e aspecto comercial dos grãos (B) nas safras das águas de 2022 e seca de 2023; e mapa de cor destas linhagens utilizando o índice fuzzy como referência.....	63
<b>Figura 8</b> – Dispersão das médias e pertinências predominantes das linhagens nos grupos de genótipos com médias inferiores (MINT), iguais (MIGT) e superiores (MSUT) à testemunha BRS FC403 das variáveis fuzzy de entrada produtividade de grãos (PG) e aspecto de grãos (AG) avaliadas nas safras das águas de 2022 e seca de 2023.....	64

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Descrição da escala de notas de aspecto de grãos do tipo carioca, adaptada de Ramalho et al. (1998) para feijão preto.....	51
<b>Tabela 2</b> - Parâmetros das funções sigmóides empregadas para representar os grupos médias inferiores à testemunha (MINT), médias iguais às testemunhas (MIGT) e médias superiores à testemunha (MSUT) das variáveis produtividade e aspecto dos grãos nas safras das águas de 2022 e seca de 2023.....	55
<b>Tabela 3</b> - Parâmetros das funções sigmóides empregadas para representar os grupos de genótipos descartados, intermediários, ótimos e ideais da variável de saída índice.....	56
<b>Tabela 4</b> - Regras adotadas no controlador fuzzy para relacionar as variáveis de entrada com a variável de saída.....	57
<b>Tabela 5</b> - Resumo da análise individual de varância/deviance para os caracteres produtividade (PG) e aspecto de grãos (AG) avaliados nos experimentos conduzidos nas safras das águas de 2022 e seca de 2023.....	60
<b>Tabela 6</b> - Resumo da análise conjunta de varância/deviance para os caracteres produtividade (PG) e aspecto de grãos (AG) avaliados nos experimentos conduzidos nas safras das águas de 2022 e seca de 2023.....	61
<b>Tabela 7</b> - Médias de produtividade (PG) e de aspecto de grãos (AG) das linhagens de feijão preto com índice fuzzy igual ou superior a 50 e das testemunhas avaliadas nos experimentos nas safras das águas de 2022 e seca de 2023.....	62

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1: FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS APLICADAS AO MELHORAMENTO DO

<b>FEIJOEIRO</b> .....	/15
<b>1 INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	16
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	19
2.1 Aspectos socioeconômicos do feijão-comum .....	19
2.2 Melhoramento do feijoeiro no Brasil .....	20
<b>3 Lógica Fuzzy: Conceitos e Aplicações</b> .....	24
3.1 Controladores Fuzzy .....	27
3.2 Base de conhecimento .....	28
3.4 Fuzzificação .....	31
3.5 Agregação .....	31
3.6 Defuzzificação.....	31
<b>3.7 Aplicações da lógica Fuzzy</b> .....	32
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	34

### CAPÍTULO 2. LÓGICA FUZZY APLICADA A SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO

<b>PRETO</b> .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>RESUMO</b> .....	48
<b>5 INTRODUÇÃO</b> .....	49
<b>6 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	51
6.1 Condução dos experimentos.....	51
6.2 Análises Estatísticas .....	51
6.3 Controlador fuzzy aplicado a seleção de linhagens.....	54
<b>7 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	60
<b>8 Conclusão</b> .....	68
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	69

## **CAPÍTULO 1**

# **FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS APLICADAS AO MELHORAMENTO DO FEIJOEIRO**

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma cultura de grande importância no Brasil, sendo cultivado em grande parte do território nacional e em quase todos os estados (Pereira *et al.*, 2009). Esta é uma das leguminosas mais importantes para o consumo humano direto devido ao elevado valor nutricional dos seus grãos (Martínez *et al.*, 2020). O consumo do feijão é predominante em regiões em desenvolvimento como o sudoeste da África e as Américas Central e do Sul. Nos países dessas regiões, o feijão é a principal fonte de proteínas, vitaminas e minerais (Rezende *et al.*, 2017). Além disso, os grãos desta leguminosa possuem alto teor de carboidratos, fibras alimentares e compostos bioativos com efeito antioxidante, como saponinas e fenólicos (Celmeli *et al.*, 2018; Bento *et al.*, 2021a; Bento *et al.*, 2021b). Os grãos desta cultura são um dos componentes básicos da dieta dos brasileiros, especialmente de populações economicamente menos favorecidas (Borém; Carneiro, 2015).

Os principais grupos comerciais do feijoeiro no Brasil são o carioca e o preto. O feijão carioca é mais produzido e consumido no País enquanto que a produção e o consumo do feijão preto são regionalizados, especialmente nos Estados do Sul do País, Rio de Janeiro e Espírito Santo. O feijão preto além de ser apreciado no Brasil também é consumido internacionalmente, o que torna a produção de grãos deste grupo um potencial produto de exportação (Cichy *et al.*, 2014). Entre as vantagens do consumo do feijão preto, e que tem promovido o seu consumo em outros Países estão os benefícios à saúde devido as suas propriedades antioxidantes, que permitem reduzir os danos causados por doenças relacionadas ao envelhecimento, o câncer e doenças cardiovasculares (Hu *et al.*, 2014).

A média de produtividade de grãos do feijoeiro no Brasil é de 1571 kg ha<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2023), considerada baixa uma vez que é possível obter valores superiores a 3000 kg ha<sup>-1</sup> em áreas irrigadas e com alto nível tecnológico. Em alguns anos o Brasil necessita importar feijão devido a baixa produção. No ano de 2021, o Brasil importou aproximadamente 120 mil toneladas de feijão-preto (CONAB, 2021). A pequena produção de feijão preto é resultante do preço atribuído no Brasil, em que na maioria das vezes é inferior aos demais grupos comerciais cultivados no País (Bolsinha, 2020). Além disso, o número reduzido de cultivares disponíveis aos produtores quando comparado ao feijão carioca (MAPA, 2024), torna difícil a escolha de cultivares adaptados aos diversos sistemas e condições de cultivo (Souza *et al.*, 2013). No intuito de atender as demandas dos produtores, comerciantes e consumidores e

principalmente aumentar a produtividade de grãos, diversas cultivares de feijão já foram recomendadas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR), Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), Universidades Federais de Lavras (UFLA) e Viçosa (UFV).

Os programas de melhoramento do feijoeiro no Brasil são, predominantemente, conduzidos por instituições públicas e, por isso, desempenham papel muito importante no desenvolvimento de linhagens superiores com potencial para recomendação aos produtores (Coelho *et al.*, 2017). Estas instituições tem se dedicado principalmente no desenvolvimento de linhagens/cultivares com elevada produtividade e qualidade comercial dos grãos (Borém; Miranda; Fritsche-Neto, 2017), resistência a doenças (Nay *et al.*, 2019; Lopes *et al.*, 2019; Costa *et al.*, 2020), e arquitetura ereta de plantas (Bertoldo *et al.*, 2010; Moura *et al.*, 2013; Soltani *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2018 a, b).

A seleção é o principal desafio dos melhoristas de feijão devido à natureza quantitativa da herança e a interação genótipos por ambientes de cada um dos caracteres de interesse (Branquinho *et al.* 2014). Estes são os principais motivos pelos quais a seleção deve ser baseada em avaliações precisas realizadas em experimentos conduzidos em diferentes locais, safras e anos. Além disso, outro desafio é a correlação entre os caracteres de interesse, que pode ser em sentidos indesejados (Santos *et al.*, 2007; Ramalho *et al.*, 2012). Os melhoristas buscam obter linhagens que reúnam os fenótipos favoráveis dos diferentes caracteres de importância, que as tornam superiores às cultivares presentes no mercado (Oliveira *et al.*, 2017b). Este é um dos motivos pelos quais a seleção de linhagens no feijoeiro é realizada de forma simultânea quando o objetivo é a recomendação de cultivares. A seleção simultânea para dois ou mais caracteres por meio de índices tem sido empregada de forma rotineira pelos programas de melhoramento do feijoeiro (Yan *et al.*, 2019). Os índices de seleção são novas variáveis que consistem na combinação dos caracteres de interesse (Cruz *et al.*, 2012). Esta estratégia torna possível selecionar genótipos que reúnam simultaneamente uma série de fenótipos desejáveis (Miranda *et al.*, 2015).

A interação genótipos por ambientes é um dos principais desafios enfrentados pelos melhoristas na seleção de progênies, linhagens e, especialmente na recomendação de cultivares. Essa interação se deve à ausência de correlação entre as médias dos genótipos avaliados em diferentes ambientes que promove inconsistência na classificação dos genótipos nos diversos

ambientes avaliados (Polizel *et al.*, 2013, Soares *et al.*, 2017). Este é o resultado da expressão diferencial dos genes ao longo dos ambientes (Van Eeuwijk *et al.*, 2016). A interação genótipos por ambientes tem efeito pronunciado na cultura do feijoeiro uma vez que esta é cultivada em diferentes locais, anos e safra. Segundo (Oliveira *et al.*, 2005), a interação genótipos por safras é que mais influência a produtividade do feijoeiro. Isso se deve ao fato das diferentes condições ambientais observadas em cada safra e a expressão diferencial dos genes em cada uma destas.

A interação genótipos por ambientes também deve ser contemplada quando o objetivo é a seleção de linhagens de forma simultânea. Algumas proposições de índices contemplam este aspecto (Santos *et al.*, 2018; Rosado *et al.*, 2012). Abordagens de inteligência artificial como a lógica fuzzy tem potencial para auxiliar na seleção multicaracterística e multiambiente. Esta abordagem baseia-se no desenvolvimento de controladores fuzzy, que são sistemas de tomada de decisão, para serem aplicados na solução de problemas que dependem da experiência do ser humano. Carneiro *et al.* (2018) verificaram que controladores fuzzy tem potencial para auxiliar nas tomadas de decisão quanto a adaptabilidade e estabilidade para produtividade de grãos na cultura do feijoeiro. Entretanto, poucos são os trabalhos que empregam essa abordagem no contexto de seleção de linhagens de forma simultânea.

## 2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

### 2.1 Aspectos socioeconômicos do feijão-comum

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa (Burle *et al.*, 2010) autógama, que apresenta taxa de fecundação cruzada de até 3% (Oliveira *et al.*, 2021). Esta espécie é originária das Américas com dois principais centros de origem. Um localizado na região dos andes e outro na região mesoamericana, próximo ao México. Destes dois centros originaram dois pools gênicos, o andino e o mesoamericano (Almeida *et al.*, 2020). Os grãos feijões andinos apresentam maior massa e tamanho, enquanto que os grãos mesoamericanos são possuem menor massa e tamanho.

O Brasil é o maior produtor e consumidor de feijão-comum do mundo, com uma produção de 2,5 milhões de toneladas em uma área de aproximadamente 1,6 milhão de hectare (ha), com rendimento médio de 1571 kg ha<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2023). Já o consumo médio desta leguminosa no foi de 15,2 kg/hab (EMBRAPA, 2021). Inicialmente, no Brasil, o cultivo de feijoeiro era realizado principalmente por agricultores familiares em pequenas áreas. Atualmente, seu cultivo envolve pequenos, médios e grandes produtores, ao longo de todo o país, em diferentes épocas de semeadura e com diferentes sistemas de manejo (Lemos *et al.*, 2020).

A cultura do feijoeiro ocupa uma posição de destaque na produção nacional, com a quarta maior área colhida, ficando atrás somente das culturas de soja, milho e cana-de-açúcar (CONAB, 2019; IBGE, 2020). O feijoeiro é cultivado no Brasil em três safras. A primeira safra é cultivada entre agosto e janeiro e representa 50% da área semeada e 40% da produção do país. Já a segunda safra tem seu cultivo previsto entre janeiro e maio, ocupando 40% da área de cultivo e abrangendo 38% da produção total. O feijoeiro da terceira safra, também chamado de safra de inverno, é cultivado entre os meses de abril e outubro, ocupando aproximadamente 10% da área total e responde por 20% da produção nacional (Ferreira; Sarmiento, 2021).

Segundo o Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2022), há 387 cultivares registradas da espécie *Phaseolus vulgaris* L. no Brasil. Esta espécie possui grande diversidade quanto aos caracteres dos grãos como, por exemplo, a cor do tegumento. No Brasil, os feijões que são mais comercializados são: carioca, preto, vermelho, roxo, mulatinho, rosinha e manteigão. Com destaque para o grão do tipo carioca, que é o mais consumido no país,

atingindo aproximadamente 70% da produção nacional (Melo *et al.*, 2010; Borém; Carneiro, 2015). O segundo grão mais plantado é do tipo preto, com maior aceitação no Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Rio de Janeiro e Sul do Espírito Santo (Barbosa; Gonzaga, 2012; Faria *et al.*, 2014).

## **2.2 Melhoramento do feijoeiro no Brasil**

Os principais programas de melhoramento do feijoeiro do Brasil são conduzidos, predominantemente, por instituições públicas como, por exemplo, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a Universidade Federal de Lavras (UFLA), a Universidade Federal de Viçosa (UFV), o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), o Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR), Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária (IPA) e a Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) (Ramalho; Abreu, 2015).

O programa de melhoramento do feijoeiro da Universidade Federal de Lavras (UFLA), teve o seu início em 1971 com a avaliação de linhagens locais (crioulas). Até próximo de 1980, a ênfase foi para feijões de cores, especialmente, roxo, rosinha, pardo e pintado. Posteriormente as pesquisas concentraram-se em feijões do tipo carioca, após a recomendação da cultivar IAC Carioca recomendada pelo IAC em 1969 (Almeida *et al.*, 1971). No estado de Minas Gerais, tanto a UFLA quanto a UFV atuam no melhoramento do feijoeiro e diversas cultivares foram recomendadas por essas instituições em parceria com a EMBRAPA e a EPAMIG (Abreu; Del Peloso, 2004).

Os programas de melhoramento genético do feijoeiro buscam desenvolver linhagens com fenótipos desejáveis que atendam aos interesses dos produtores, comerciantes e consumidores (Amabile *et al.*, 2018; Tsutsumi *et al.*, 2015). Os principais programas de melhoramento do país têm ênfase na obtenção de cultivares com alta produtividade, arquitetura ereta de plantas, resistência a pragas e doenças, além de bom aspecto comercial de grãos (Barili, 2015; Barili *et al.*, 2016). Reunir em uma nova cultivar todos os fenótipos de interesse não é tarefa simples uma vez que fatores como a herança das características e a correlação entre estas influenciam na obtenção das linhagens superiores. Trindade *et al.* (2020), observaram ganhos com a seleção de 8,0% para produtividade de grãos, 0,5% para aspecto de grãos e 0,3% para arquitetura de planta em linhagens de feijão preto. De acordo com Barili *et al.* (2016a), ao longo

de cinco décadas de melhoramento de feijão preto houve ganho anual de 2,42% para produtividade de grãos e de 2,36%, 2,24% e 1,42% para os componentes número de vagens por planta, número de grãos por vagem e massa de 1000 grãos respectivamente.

As doenças que acometem o feijoeiro são uma das principais causas de redução da produtividade de grãos, uma vez que essa leguminosa é hospedeira de inúmeros fitopatógenos (Passos, 2016; Tsutsumi *et al.*, 2015). Pode-se citar como principais doenças: antracnose, mancha-angular, crestamento bacteriano comum, ferrugem, mosaico-dourado, murcha-de-fusarium e o mofo-branco (Júnior *et al.*, 2015; Martins, 2015; Tsutsumi *et al.*, 2015). Nesse cenário, o melhoramento de plantas visa desenvolver cultivares resistentes a essas doenças, pois essa medida é de fácil adoção pelos agricultores, por ser de baixo custo, além de reduzir a poluição ambiental causada pelo uso indiscriminado de defensivos agrícolas (Ramalho; Abreu, 2015; Cândida *et al.*, 2009). Esse processo de melhoramento deve ser contínuo, pois existe um grande desafio, que é desenvolver resistência duradoura, já que os patógenos apresentam variabilidade genética, implicando na quebra de resistência (Ramalho; Abreu, 2015; Di Piero & Garda, 2008). Entre as estratégias de melhoramento adotadas no feijoeiro com o objetivo de obtenção de cultivares resistentes destacam-se os retrocruzamentos (Almeida *et al.*, 2021) e a seleção recorrente (Arantes *et al.*, 2010; Pádua *et al.*, 2021).

A arquitetura da planta do feijoeiro é outra característica de grande importância principalmente para os produtores que desejam realizar a colheita mecanizada (Cunha *et al.*, 2005; Pires *et al.*, 2014). Além disso, plantas eretas que não acamam contribuem para uma menor severidade de doenças como o mofo branco (Vieira *et al.*, 2005) por propiciarem um microclima desfavorável ao desenvolvimento da doença devido a maior aeração entre as plantas. A arquitetura de plantas é determinada por vários caracteres, entre eles, destacam o hábito de crescimento e o tipo de planta. Outros caracteres de importância para a arquitetura de plantas é a altura de inserção da primeira vagem, altura de plantas, ângulo de inserção dos ramos e diâmetro do hipocótilo (Moura *et al.*, 2013).

O aspecto comercial de grãos é uma característica fundamental para a aceitação de uma cultivar. A preferência dos consumidores e dos agricultores varia quanto a essa característica (formato, tamanho, brilho, cor), influenciando na comercialização do produto e na aceitação do produto no mercado (Trindade, 2020). Para cada um dos tipos comerciais existem padrões de grãos desejáveis. A preferência nacional no que se refere a feijão com grão preto é pelo opaco, com peso de 100 grãos em torno de 24 gramas e formato elíptico (Alvares, 2015; Pereira *et al.*,

2013). Uma cultivar padrão quanto a qualidade dos grãos é a Ouro Negro, entretanto esta apresenta plantas prostradas e suscetibilidade a diversas doenças do feijoeiro (Souza Filho, 1991).

Segundo Borém e Miranda (2013) os principais métodos de melhoramento comuns às plantas autógamas são: introdução de plantas, seleção de linhas puras e a hibridação. A hibridação é o principal método empregado pelos programas de melhoramento do feijoeiro. Segundo Ramalho *et al.* (1993), na condução de um programa de melhoramento por hibridação, a escolha de genitores é a decisão mais importante a ser tomada pelo melhorista, pois dela dependerá o sucesso do programa. Quando se trata de características de herança quantitativa, como produtividade de grãos, a escolha dos genitores é complexa. Estes devem ser escolhidos de modo a gerar populações segregantes de média alta e ampla variabilidade para o caráter desejado (Ramalho *et al.*, 2001).

Dois são os princípios empregados para escolha dos genitores: desempenho per se ou avaliação da descendência de cruzamentos envolvendo os possíveis genitores (Menezes Júnior, 2011; Silva, 2009). Ambas as estratégias têm sido empregadas no melhoramento do feijoeiro visando produtividade de grãos, arquitetura de plantas, aspecto dos grãos e resistência a doenças. Mencialha *et al.* (2022), identificaram potenciais genitores com resistência a antracnose por meio de inoculações artificiais das cultivares de feijão carioca recomendadas no Brasil. Vale *et al.* (2015), empregaram análise dialélica para identificar genitores para serem empregadas visando melhoramento para precocidade e produtividade de grãos.

A maior eficácia dos programas de melhoramento está relacionada com a escolha do método apropriado de condução das populações segregantes (Pimentel *et al.*, 2013). Os métodos de condução de populações segregantes são agrupados em duas categorias, aqueles que praticam a seleção simultaneamente com o avanço das gerações, ou seja, os métodos genealógicos e massal. E aqueles em que a seleção só é iniciada após algumas gerações de endogamia, os métodos bulk, bulk dentro de progênie e o single seed descendent (SSD) (Fehr, 1987; Borém; Miranda, 2017). Os métodos de condução de populações segregantes mais utilizados para a cultura do feijoeiro são o método genealógico ou “pedigree”, o da população ou bulk, o da descendência por uma única semente (SSD), e o método bulk dentro de famílias  $S_0$ ,  $S_1$  ou  $S_2$  (Menezes Júnior, 2011; Silva, 2009). O interesse dos programas de melhoramento do feijoeiro é por cultivares que apresentem elevada produtividade de grãos, arquitetura ereta e principalmente boa qualidade comercial dos grãos, entre outros caracteres. Portanto, é comum

considerar mais de um caráter de interesse simultaneamente durante a seleção. Dessa forma, a utilização de um índice de seleção auxiliar na tomada de decisão do melhorista, uma vez que o índice de seleção é estabelecido pela combinação ótima de vários caracteres (Cruz *et al.*, 2012).

Diversos índices foram propostos, os quais buscam uma combinação linear ótima para um conjunto de características de interesse (Cruz & Carneiro, 2003; Bernardo, 2002). Dentre eles, o índice de distância genótipo-ideótipo baseado no BLUP (FAI-BLUP) (Rocha *et al.* 2017), índice Z (Lima *et al.*, 2012), índice de distância multicaracterística genótipo-ideótipo (MGIDI) (Olivoto & Nardino (2021), índice multigerações de progênies (Resende *et al.*, 2015), entre outros. Em alguns desses índices podem ocorrer problemas devido a multicolinearidade entre os caracteres, dificultando o emprego destas metodologias (Laidig *et al.*, 2017). No melhoramento de plantas, os procedimentos estatísticos de avaliação genética desempenham papel fundamental, pois auxiliam na seleção acurada de progênies e linhagens superiores, que futuramente poderão se tornar novas cultivares. A utilização de técnicas adequadas permite uma seleção acurada, o que torna os programas de melhoramento mais eficientes. A abordagem de modelos mistos por meio de REML/BLUP (Restrict Maximum Likelihood/Best Linear Unbiased Prediction) é uma ferramenta que tem sido empregada pelos programas de melhoramento de diversas culturas para auxiliar nas tomadas de decisão. Uma das vantagens do seu emprego é possibilidade analisar dados desbalanceados de forma apropriada (Pimentel *et al.*, 2014).

Metodologias baseadas em modelos mistos (REML/BLUP) são atualmente amplamente utilizadas em programas de melhoramento de plantas em diversas culturas (Sousa *et al.* 2019), para a cana-de-açúcar (Ferraudo & Perecin, 2014), arroz (Streck *et al.*, 2009), cenoura (Silva *et al.*, 2011), café (Rocha *et al.*, 2015), clones de Eucalyptus (Castro *et al.*, 2018), algodão (Carvalho *et al.*, 2016), feijão (Souza *et al.*, 2018), feijão (Torres *et al.*, 2016), soja (Follmann *et al.*, 2019), milho (Crevelari *et al.*, 2019; Nardino *et al.*, 2016), trigo (Pimentel *et al.*, 2014b; Szareski *et al.*, 2018). O procedimento REML (Máxima Verossimilhança Residual) estima os componentes de variância e parâmetros genéticos, e BLUP (Best Linear Unbiased Prediction), procedimento para estimar efeitos genéticos aditivos, de dominância e efeitos genotípicos (Resende, 2016).

A abordagem de modelos mistos tem sido utilizada com mais frequência na cultura do feijoeiro para auxiliar na seleção de progênies e linhagens. Santana *et al.* (2023), utilizaram a metodologia REML/BLUP para auxiliar na seleção de linhagens avaliadas em diferentes

experimentos conduzidos com delineamentos e número de repetições distintos. Resende (2015a) utilizou BLUP com informação de multigerações para a seleção de famílias, de modo a minimizar os efeitos de safra e gerações. Ao trabalhar com populações segregantes de feijoeiro-comum, Paula (2016) concluiu que a utilização de modelos mistos no melhoramento do feijoeiro é promissora.

Várias são as alternativas utilizadas para realizar a seleção de linhagens superiores baseando-se em vários caracteres simultaneamente. Dentre estas, a mais popular entre os melhoristas tem sido o uso de índices de seleção (Ramalho *et al.*, 2012). No entanto, com a complexidade de múltiplos genótipos, parâmetros e classificações produzidos por essas metodologias dificulta a tomada de decisão pelos melhoristas. Um processo alternativo que pode ser usado para melhor compreensão e tomada de decisão no processo de seleção de linhagens é o uso de ferramentas de inteligência artificial, como a lógica fuzzy, que permite a associação de informações entre diferentes parâmetros (Da Silva Júnior *et al.*, 2021). Portanto, o uso de ferramentas e estratégias como esta podem ajudar a tomar decisões assertivas e de fácil interpretação são indispensáveis para o sucesso dos programas de melhoramento (Carneiro *et al.*, 2018).

### **3 Lógica Fuzzy: Conceitos e Aplicações**

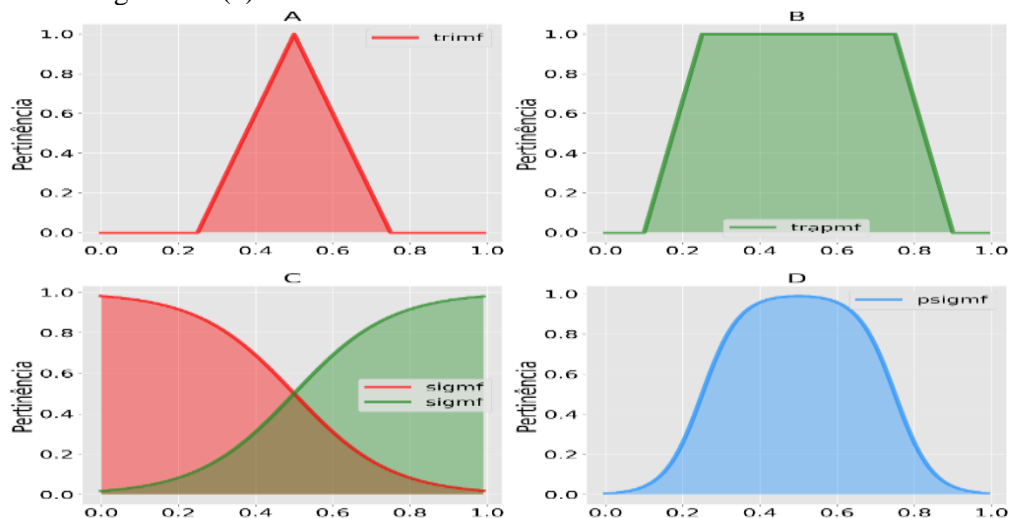
A inteligência artificial é a área da ciência da computação que visa simular, em máquinas, a capacidade de solucionar problemas e realizar tarefas que são uma habilidade da inteligência natural do homem (Norvig; Russell, 2013). A lógica fuzzy proposta por Zadeh (Zadeh, 1965, 1983, 1996, 1997, 1999, 2004, 2008), também conhecida como lógica nebulosa ou teoria das possibilidades é a área da inteligência computacional inspirada na forma de raciocínio humano, que é baseado em aproximações e incertezas.

Esta técnica provê um método de traduzir expressões verbais, que são imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em valores numéricos (Simões & Shaw, 2007). Com esse objetivo, a lógica fuzzy baseia-se em uma teoria de conjuntos, denominada teoria de conjuntos fuzzy, totalmente inovadora e diferente do que é empregado na lógica clássica. Na teoria clássica, uma observação possui somente duas alternativas de ser alocada em um grupo, ou seja, ela está em um grupo com pertinência 1 ou não está com pertinência 0. Ao contrário da teoria clássica, a lógica fuzzy assume que uma observação possui um grau de pertencimento a um grupo, que varia de 0 a 1 (Da Silva *et al.*, 2019). Esta pertinência é obtida por meio de

funções, que são utilizadas conforme a estrutura e complexidade da variável em estudo. Por exemplo, suponha que se deseja subdividir a variável produtividade de grãos em feijão em dois conjuntos de linhagens: médias elevadas ou médias baixas. O grau de pertencimento de uma linhagem no grupo de médias elevadas será determinado por uma função, que pode ser escolhida conforme o conhecimento do pesquisador no problema em questão. O mesmo é válido para o grupo de médias baixas.

Uma variável linguística é um conjunto de termos linguísticos, que são nomes ou rótulos representados por conjuntos fuzzy, dentro de um determinado universo de discurso (Simões e Shaw, 2011). Quando observadas sob o aspecto da lógica fuzzy, as variáveis são classificadas como linguísticas, uma vez que os valores assumidos por essa variável são expressões verbais, representadas por conjuntos fuzzy (Zadeh, 1975a; b; c). Esses conjuntos fuzzy são agrupamentos imprecisos, onde a transição de não pertinência para pertinência em um grupo é gradual, com valores dentro do intervalo entre 0 e 1 (Jang *et al.*, 2012). Existem diferentes funções de pertinências que podem ser utilizadas para representar conjuntos de uma determinada variável linguística, ou seja, um mesmo conjunto pode ser representado por diferentes funções. Assim, a experiência do desenvolvedor de um controlador é de grande importância na escolha de funções que melhor representem uma variável linguística (Carneiro, 2015). Exemplos de funções empregadas para representar conjuntos fuzzy em controladores são triangulares, trapezoidais, sigmóides e combinação de duas sigmóides (Figura 1a, 1b, 1c, 1d).

**Figura 1** - Gráfico das funções de pertinência triangular (a), trapezoidal (b), sigmóides (c) e combinação de duas sigmóides (d).



Fonte: Do autor (2024).

A função de pertinência triangular é dada pela seguinte função:

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$$

em que  $a$  e  $c$  são os pontos em que assume pertinência nula e  $b$  assume pertinência igual a 1.

A função de pertinência trapezoidal é dada pela seguinte função:

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$$

em que  $a$  e  $d$  são os pontos em que assume pertinência nula e  $b$  e  $c$  assume pertinência igual a 1.

A função de pertinência sigmoide é apresentada a seguir:

$$y = \frac{1}{1+e^{-c(x-b)}},$$

em que,  $x$  é o vetor de dados da variável fuzzy de entrada;  $b$  é parâmetro de deslocamento horizontal, que corresponde ao valor  $x$  no qual a pertinência representada na função é igual a 0,50 e  $c$  é o parâmetro de inclinação da função sigmoide. Há também a possibilidade de representar um grupo por meio da combinação de duas funções sigmoides:

$$f_1(x) = \frac{1}{1+e^{-c_1(x-b_1)}},$$

$$f_2(x) = \frac{1}{1+e^{-c_2(x-b_2)}},$$

em que,  $x$  é o universo das características, ou seja, vetor de dados da variável fuzzy de entrada;  $b_1$  é parâmetro de deslocamento horizontal, que corresponde ao valor  $x$  no qual a pertinência representada na primeira função sigmoide é igual a 0,50 e  $c_1$  é o parâmetro de inclinação da primeira função sigmoide. Já  $b_2$  é parâmetro de deslocamento horizontal, que corresponde ao valor  $x$  no qual a pertinência representada na segunda função sigmoide é igual a 0,50 e  $c_2$  é o parâmetro de inclinação da segunda função sigmoide.

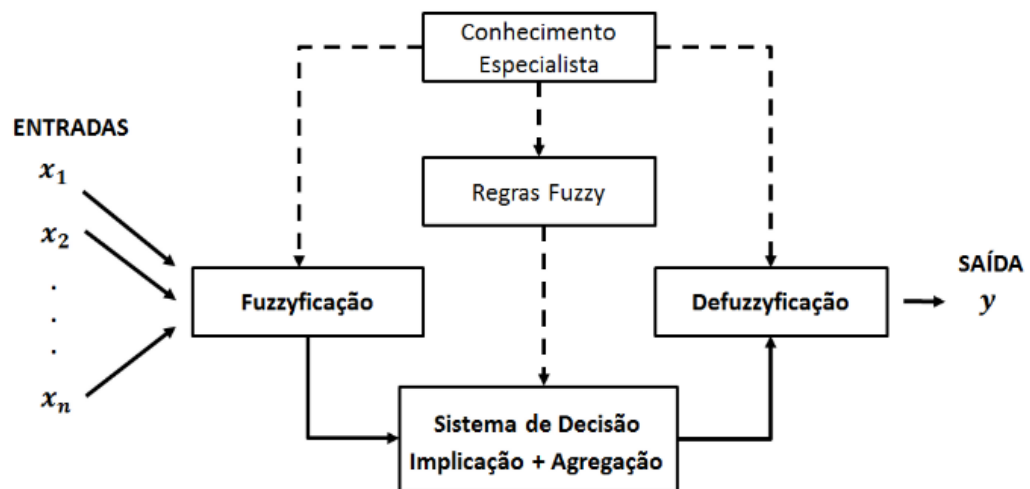
### 3.1 Controladores Fuzzy

Uma das vantagens do emprego da lógica fuzzy na solução de problemas é a possibilidade da utilização da experiência de pesquisadores com grande conhecimento em tomadas de decisão. Estes pesquisadores podem definir os grupos que compõe uma variável, que muitas das vezes são empregados termos qualitativos e verbais para caracteriza-los. Além disso, eles determinarão as funções de pertinência que caracterizam cada um dos grupos. Portanto, estes pesquisadores podem transferir seu conhecimento por meio da lógica fuzzy para sistemas de tomada de decisão, denominados como controladores fuzzy. No caso do melhoramento de plantas, o potencial desta abordagem na seleção de genótipos já foi comprovada (Cardoso *et al.*, 2021; Carneiro *et al.*, 2019, 2020, 2018; Silva Júnior *et al.*, 2021).

Os controladores fuzzy são sistemas empregados nas tomadas de decisão que tem caráter multivariado e dependem da experiência dos seres humanos (Lee, 1990; Pang; Bai, 2013; Casillas *et al.*, 2013; Mushtaq *et al.*, 2016). Estes sistemas são empregados em problemas simples ou complexos em diferentes áreas como: medicina (Xu & Zhang, 2022), financeira (Keller *et al.*, 2019) e ciência da computação (Boente *et al.*, 2024). A lógica fuzzy tem potencial de contribuir no melhoramento vegetal uma vez que esta área também possui problemas de natureza similar. Por exemplo, os programas de melhoramento do feijoeiro estão constantemente selecionando linhagens superiores quanto a vários caracteres por meio de índices de seleção (Mambrin *et al.*, 2015). Os controladores fuzzy tem função similar a um índice, que visa reunir a informação de várias características para determinar a seleção. A grande vantagem desta abordagem é a possibilidade de incorporar a experiência dos pesquisadores que trabalham com o melhoramento da cultura nos controladores fuzzy.

O projeto de desenvolvimento de um controlador fuzzy (Figura 2) apresenta as seguintes etapas: base de conhecimento, interfaces de fuzzificação e de defuzzificação (Simões & Shaw, 2007). O funcionamento de controladores fuzzy depende inicialmente da transformação dos valores no domínio do mundo real (entradas), que são os valores de uma observação quanto as diferentes características, para o domínio fuzzy (pertinências). As operações matemáticas destes controladores são realizadas no domínio fuzzy por meio de regras fuzzy. Uma vez realizadas estas operações há uma transformação inversa do domínio fuzzy para o domínio dos valores reais de saída empregados na tomada de decisão, conforme Figura 2.

**Figura 2** - Estrutura de sistema de tomada de decisão Fuzzy



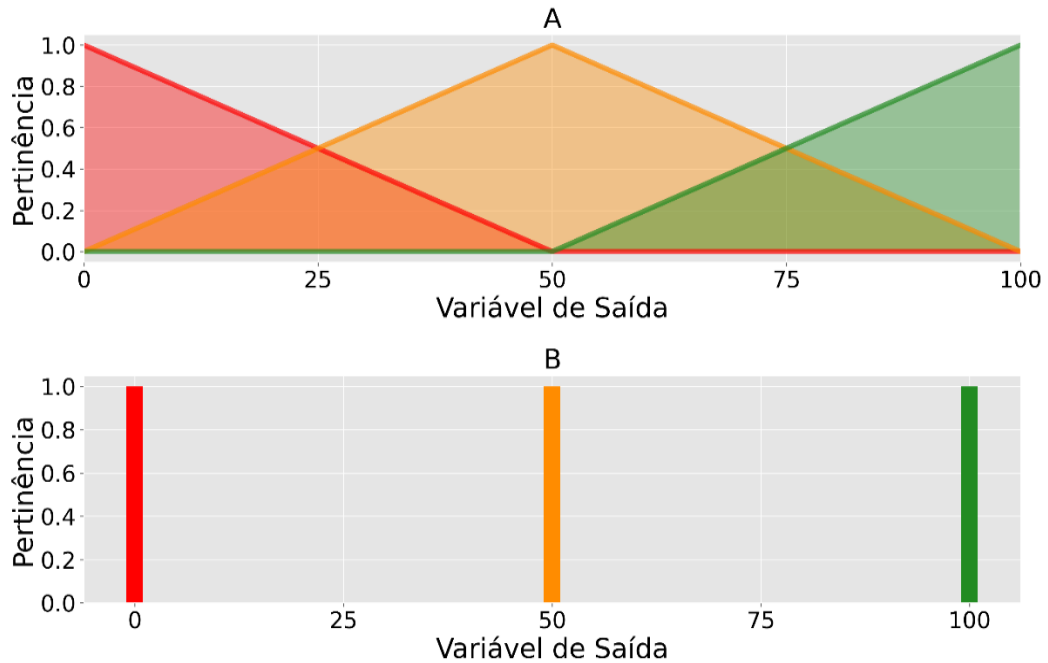
Fonte: Carneiro et al (2018).

### 3.2 Base de conhecimento

A base de conhecimento é a primeira fase no projeto de um controlador fuzzy e representa o modelo adotado que permitirá a tomada de decisão a respeito de uma determinada situação. Assim, o primeiro passo para o desenvolvimento de um controlador capaz de solucionar um problema é a determinação da base de dados que se baseia na seleção de variáveis de entrada que apresentam relevância no processo como um todo, devendo levar em consideração a relação destas variáveis com a variável de saída a ser criada pelo desenvolvedor do controlador (Carneiro, 2015). Portanto, o conhecimento sobre o problema a ser solucionado é passado ao controlador por meio da criação das variáveis de entrada, da variável de saída, do estabelecimento das regras fuzzy que determinam a relação entre as entradas e a saída.

Dois sistemas de inferência fuzzy são responsáveis por estabelecer toda a estrutura de controlador fuzzy. Estes são conhecidos por Mandani (Mamdani; Assilian, 1975) e Sugeno (Takagi, Sugeno, 1985; Sugeno AND Kang, 1988a; b; Sugeno; Tanaka, 1991; Sugeno; Yasukawa, 1993). A principal diferença entre os dois sistemas consiste na forma como é elaborada a variável de saída. No sistema de inferência Mandani a variável de saída é gerada de forma similar à variável de entrada, ou seja, será composta por conjuntos representados por funções de pertinência conforme figura 3A. Já no sistema de inferência Sugeno figura 3B, a variável de saída é composta por grupos representados por singletons, que são funções, que podem ser constantes ou não.

**Figura 3** - Variáveis fuzzy de saída utilizadas no sistema de inferência Mandani (A) e Sugeno (B).



Fonte: Do autor (2024).

### 3.3 Regras Fuzzy

As regras fuzzy relacionam as variáveis de entrada e saída, de modo a expressar a relação de causa e efeito entre essas variáveis. A base de regras caracteriza os objetivos e a estratégia adotada para inferir uma situação e permitir uma tomada de decisão adequada. As regras podem ser obtidas por meio de entrevistas com operadores humanos experientes, que detêm as informações necessárias para obter o melhor desempenho em um determinado processo (Carneiro, 2015). É necessário que as regras fuzzy contemplem todas as situações possíveis de ocorrência nas entradas para que o controlador fuzzy atue de forma eficaz na tomada de decisões. Apesar de grande número de regras gerado, a lógica fuzzy é eficiente e veloz, no processamento dos dados, já que as regras são ativadas em paralelo durante o processamento (Simões; Shaw, 2007).

As regras fuzzy são responsáveis por conter a experiência de um especialista em um determinado assunto, de forma a permitir que o computador, por meio das regras, consiga tomar decisões que são realizadas pelo ser humano. As regras permitem que uma ou mais variáveis de entrada gerem uma única variável saída, na forma de um valor fuzzy discreto ou agregado

e, para que isso seja possível, as regras se baseiam em premissas ou condições que gerem uma determinada consequência:

SE<condições>ENTÃO<conclusão>

SE var1 = A <conectivo> var2 = B, ENTÃO vars = C;

em que  $A$  e  $B$  são conjuntos fuzzy das variáveis linguísticas de entrada  $var1$  e  $var2$ , respectivamente, enquanto que  $C$  é um conjunto fuzzy da variável de saída  $vars$ . Já o <conectivo> é um operador que permite relacionar conjuntos fuzzy de variáveis distintas (Jang *et al.*, 2012). Na lógica fuzzy são utilizados diversos operadores lógicos que apresentam os princípios dos operadores booleanos de intersecção (E), união (OU) e complemento (NÃO) (Zadeh, 1965).

O conectivo E, que representa a intersecção entre dois conjuntos, é responsável por combinar as pertinências de conjuntos de diferentes variáveis de entrada nos controladores fuzzy. Os operadores mínimo e produto algébrico são os mais empregados para representar a intersecção. A seguir é apresentada a representação do operador mínimo:  $T_{min}(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$  em que *min* representa o menor valor entre as pertinências  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ . O produto algébrico é a seguir representado:  $T_{pa}(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$ , em que “.” representa o produto entre as pertinências  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ .

O conectivo OU é utilizado para expressar relação de união entre conjuntos (Simões; Shaw, 2007). Os principais operadores lógicos para representar a união são o máximo e a soma algébrica, apresentados a seguir:

*Máximo:*  $S(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = (\mu_A(x) \vee \mu_B(x))$ , em que *max* representa o valor máximo entre as pertinências  $\mu_A(x)$ , e  $\mu_B(x)$

*Soma algébrica:*  $S(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$ , em que “.” representa o produto entre as pertinências  $\mu_A(x)$  e  $\mu_B(x)$ .

O complemento de um conjunto fuzzy em relação a um universo de discurso é composto por todos os elementos que não pertencem a este conjunto. Por meio do complemento é possível utilizar regras que levam em consideração mais de um conjunto de uma mesma variável de entrada, a pertinência do complemento de um conjunto “A” é obtida como se segue:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x),$$

em que  $\mu_A(x)$  é a pertinência de um elemento em um ponto qualquer de uma variável qualquer.

### 3.4 Fuzzificação

Uma vez desenvolvida toda a estrutura de um controlador fuzzy mencionado anteriormente, os dados reais de cada observação são submetidos ao controlador fuzzy que irá processar todas estas informações e gerar uma saída conforme as regras estabelecidas previamente. A fuzzificação é a etapa na qual os dados numéricos para cada variável são submetidos às suas respectivas funções de pertinência de modo a obter a pertinência das observações nos grupos que compõe cada uma das variáveis de entrada. Esses valores de pertinências são utilizados na etapa de implicação, que consiste no processamento de cada regra individualmente de modo a obter os valores de pertinências para a observação em questão na variável de saída. Portanto, para cada regra são obtidas as pertinências na variável de saída (Carneiro, 2015).

### 3.5 Agregação

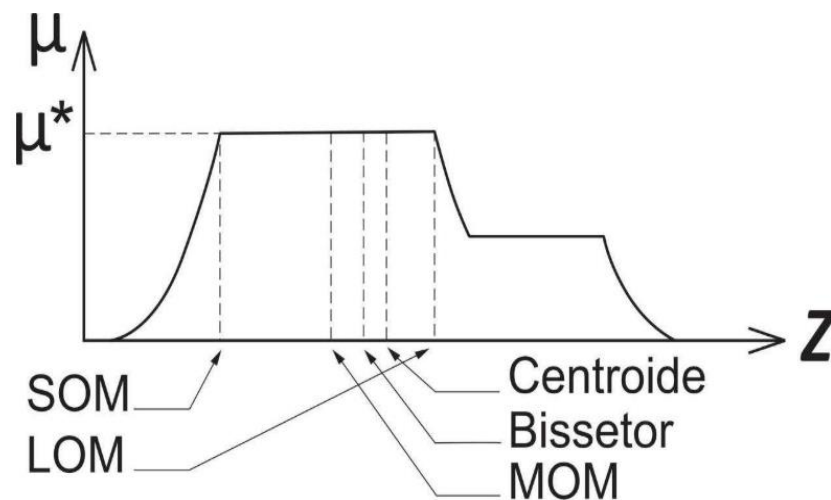
A agregação consiste em combinar as saídas em forma de pertinência de cada regra em um único resultado (Jang *et al.*, 2012). Entretanto, esse resultado está na forma de pertinência e muitas vezes é necessário convertê-lo em valores discretos, que é realizado na etapa de defuzzificação. De acordo com o sistema inferência adotado, além do processamento das regras de forma individual (implicação) existe a necessidade de um processamento dos valores fuzzy das saídas de cada regra de forma conjunta (Mathworks, 2015). Assim, a etapa de agregação consiste em reunir as saídas das várias regras que compõe um controlador fuzzy por meio de operadores fuzzy, de modo que a saída fuzzy representa um valor agregado a respeito de uma observação (Carneiro, 2015).

### 3.6 Defuzzificação

A defuzzificação é um procedimento que possibilita interpretar a distribuição de pertinência da saída de um conjunto fuzzy de modo quantitativo, ou seja, fornece um valor numérico representativo que captura o significado essencial dessa distribuição. De acordo com Simões e Shaw (2011), na defuzzificação, o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras fuzzy será traduzido em um valor de saída a ser interpretado. O objetivo é obter um único valor numérico que melhor represente os valores fuzzy inferidos da variável linguística de saída.

Comparado com as técnicas multivariadas de índice de seleção empregadas no melhoramento, o valor obtido da defuzzificação é o próprio valor do índice obtido. Portanto, a resposta do controlador fuzzy é o valor defuzificado. Existem diferentes técnicas de defuzzificação: bissetor, centroide, média dos máximos, maior dos máximos e menores dos máximos (Mamdani, 1974) (Figura 4).

**Figura 4** – Diferentes métodos de defuzzificação



**SOM:** Menor valor do máximo (Retorna o valor mínimo em magnitude dos valores que apresentaram pertinência máxima); **LOM:** Maior valor do máximo (Retorna o valor máximo em magnitude dos valores que apresentaram pertinência máxima); **MOM:** Média dos máximos (Retorna o valor médio dos valores numéricos que apresentaram pertinência máxima); **Centróide:** (Retorna o centro geométrico da área sob curva obtida no processo de agregação); **Bissetor:** (Considera o ponto que separa a área obtida após a etapa de agregação em duas regiões de igual área)

Fonte: Jang *et al.*, 2012

### 3.7 Aplicações da lógica Fuzzy

A lógica fuzzy é amplamente utilizada em diversas áreas como robótica, controle de fluxo de caixa, análise de risco (Dill, 2005), controle de estoques (Von Altrock, 1996), controle de qualidade (Maniçoba, 2013), entre outros, ganhando maior espaço atualmente em otimizações (Ganga *et al.*, 2011) e automação industrial (Simões and Shaw, 2007). Carneiro *et al.* (2019) utilizaram um controlador fuzzy para automatizar a tomada de decisão quanto a classificação de genótipos de feijão de acordo com os critérios dos métodos de Cruz *et al.* (1989) e Annicchiarico (1992). Os autores demonstraram que o sistema fuzzy foi eficiente em

classificar os genótipos, sendo recomendado o uso em estudos de adaptabilidade e estabilidade para recomendação de cultivares.

Carneiro *et al.* (2020) com linhagens de feijão e Silva Júnior *et al.* (2021) com linhagens de arroz, utilizaram controlador fuzzy para identificação do comportamento de linhagens segundo o método de Eberhart & Russel (1966) e controlador híbrido, desenvolvido a partir da associação dos métodos de Eberhart & Russel (1966) e Lin & Binns (1988) modificado por Carneiro (1998). Em ambos os trabalhos, os controladores foram eficientes em identificar o comportamento das linhagens, sendo o controlador híbrido de maior discriminação.

Como as estratégias utilizadas para gerar informações de recomendação de linhagens e cultivares são variadas e/ou complexas, e costumam estar associadas a certo nível de dificuldade de interpretação, novas abordagens que auxiliam na interpretação e tomada de decisão são, muitas vezes, preferidas (Carneiro et al., 2018). Diante das limitações dos métodos tradicionais, a lógica fuzzy vem ganhando espaço e apresenta grande potencial, dado que permite traduzir expressões verbais, geralmente imprecisas, em valores numéricos, proporcionando a automação computacional da experiência de um especialista (Papadopoulos et al., 2011; Mardani et al., 2015). Além disso, esta abordagem apresenta potencial para ser empregada em áreas em que ainda não foram exploradas e que necessitam de auxílio de novas ferramentas para solucionar diferentes problemas, como a área de genética e melhoramento de plantas em estudos seleção de genótipos e de recomendação de cultivares (Carneiro, 2018).

## REFERÊNCIAS

- ABREU, A F B.; DEL PELOSO, M J. **Cultivares de Feijoeiro Comum para o Estado de Minas Gerais**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão. Circular Técnica, 65. 4 p, 2004.
- ALMEIDA, C P.; PAULINO, J F C.; MORAIS CARBONELL, S A.; CHIORATO, A F.; SONG, Q.; DI VITTORI, V.; BENCHIMOL-REIS, L L. (2020). **Genetic Diversity, Population Structure, and Andean Introgression in Brazilian Common Bean Cultivars after Half a Century of Genetic Breeding**. Genes (Basel), 11(11). doi:10.3390/genes11111298.
- ALMEIDA, C P.; PAULINO, J F C.; SANTOS, I L.; BAJAY, M M.; GONÇALVES, J G R.; CARVALHO, C R L.; CARBONELL, S A M.; CHIORATO, A F. **Marker-assisted backcrossing for disease resistance and agronomic traits in carioca beans**. agronomy, v. 61, n. 4, 2510-2521, 2021. Doi: 10.1002/csc2.20528.
- ALMEIDA, L D A.; LEITÃO FILHO, H F.; MYASAKA, S. **Características do feijão carioca, um novo cultivar**. Bragantia, Campinas, v. 30, p. 33-38, abr. 1971.
- ALVARES, R C. **Escurecimento de grãos em feijão: parâmetros genéticos e fenotípicos, associação com tempo de cocção, seleção assistida por marcadores e obtenção de linhagens elite**. 2015. 136 p. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
- AMABIELE, R F.; VILELA, M S.; PEIXOTO, J. R. **Melhoramento de plantas: variabilidade genética, ferramentas e mercado**. Embrapa Cerrados-Livro técnico (INFOTECA-E), 2018. Disponível em:<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1106825>. Acesso em: 09 de mar de 2022.
- ANNICCHIARICO, P. **Cultivar adaptation and recommendation from alfalfa trials in Northern Italy**. Journal of Genetics and Breeding, v.46, p.269-278, 1992.
- ARANTES, L O.; ABREU, A F B.; RAMALHO, M A P. **Eight cycles of recurrent selection for resistance to angular leaf spot in common bean**. Crop Breeding and Applied Biotechnology, v. 10, p. 232-237, 2010. Doi: 10.1590/S1984-70332010000300008.
- BARBOSA, F R.; GONZAGA, A C. **Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum na Região Central-Brasileira: 2012-2014**. Santo Antônio de Goiás.
- BARILI, L D. **Evolução dos cultivares de feijão carioca recomendados no Brasil**. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) Departamento de Biologia- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, p.38, 2015.
- BARILI, L D.; VALE, N M.; CARNEIRO, J E S.; SILVA, F F.; SILVA, F L. **Five decades of black common bean genetic breeding in Brazil**. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 46, n. 3, p. 259-266, 2016a. doi: 10.1590/1983-40632016v4641371.

BARILI, L D.; VALE, N M.; MOURA, L M.; PAULA, R G.; SILVA, F F.; e CARNEIRO, J E S. (2016). **Genetic progress resulting from forty-three years of breeding of the carioca common bean in Brazil**. Genetics and Molecular Research, 15, 1–11. <http://dx.doi.org/10.4238/gmr.15038523>.

BENTO, J A C. **Perfil químico de farinhas de feijão colorido (*Phaseolus vulgaris* L): Alterações influenciadas pelo método de cocção**. Química dos Alimentos, v.356, p.129718. 2021a.. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030881462100724X>>. Acessado em: 12 de janeiro de 2022. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.129718.

BENTO, J A C.; RIBEIRO, P R V.; BASSINELLO, P Z.; BRITO, E. S. de; CALIARI, M.; SOARES JÚNIOR, M S. **Perfil fenólico e saponínico em grãos de feijão carioca durante o armazenamento**. LWT-Food Science Technology, v.139, p.110599. 2021b. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643820315875>>. Acesso: 12 de janeiro de 2022. doi: 10.1016/j.lwt.2020.110599.

BERNARDO, R. **Breeding for quantitative traits in plants**. Woodbury: Stemma, 2002. 368p.

BERTOLDO, J G.; BARILI, L D.; VALE, N M.; COIMBRA, J L M. **Genetic gain in agronomic traits of common bean in the region of Planalto Catarinense**. Euphytica, 171: 381-388, 2010.

BOENTE, K P.; COSENZA, C A N.; PEREZ, S E C; MARQUES, S F V.; BASTOS, A G.; MARCIANO, S R. **Modelo Fuzzy de caracterização de aplicações em ambiente de computação na nuvem**. Revista de Gestão e Secretariado – GeSec, V. 15, N. 5, P. 01-21, 2024. DOI: <http://doi.org/10.7769/gesec.v15i5.3710>.

BOLSINHA. Informativos: **Boletim informativo feijão. 2020**. Disponível em: <https://www.bolsinha.com.br/br/>. Acesso em: 14 mar 2022.

BORÉM, A.; CARNEIRO, J E S.; A cultura. In: CARNEIRO, J E S.; PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. (Ed.). **Feijão do plantio a colheita**. 1. ed. Viçosa: UFV. 2015. p. 9-15.

BORÉM, A.; MIRANDA, G V.; FRITSCHÉ-NETO, R. (2017) **Melhoramento de plantas 7ª edição**. Viçosa: Editora UFV. 543 p.

BORÉM, A.; MIRANDA, G.V. **Melhoramento de plantas**. 6. ed. Viçosa: Viçosa UFV, 2013.

BRANQUINHO, RG.; DUARTE, JB; SOUSA, P.; SILVA, N S P e PACHECO, RM. (2014) **Estratificação ambiental e otimização de rede de ensaios de genótipos de soja no Cerrado**. Pesquisa Agropecuária Brasileira 49: 783-795.

BURLE, M L.; FONSECA, J R.; KAMI, J A.; GEPTS, P. (2010). **Microsatellite diversity and genetic structure among common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) landraces in Brazil, a secondary center of diversity**. Theor Appl Genet (2010) 121:801–813. DOI 10.1007/s00122-010-1350-5.

CÂNDIDA, D V.; COSTA, J G C.; RAVA, C A.; CARNEIRO, M S. **Controle genético da murcha do fusário (*Fusarium oxysporum*) em feijoeiro comum**. Tropical Plant Pathology, vol. 34, 6, 379-384 (2009).

CARNEIRO, A R T.; **Fuzzy logic applied to different adaptability and stability methods in common bean**. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, v. 55, 2020.

CARNEIRO, A R T.; SANGLARD D A.; AZEVEDO, A M.; SOUZA, T L P O.; PEREIRA, H S.; MELO L C. **Fuzzy logic in automation for interpretation of adaptability and stability in plant breeding studies**. Scientia Agricola, v. 76, n. 2, p. 123–129, 2019.

CARNEIRO, A R T.; SANGLARD, D A.; AZEVEDO, A M.; SOUZA, T L P O.; PEREIRA, H S.; MELO L C.; CARNEIRO, P C S. **Lógica fuzzy na recomendação de cultivares de feijoeiro comum quanto à adaptabilidade e estabilidade**. 2016. 125f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) Universidade Federal de Minas Gerais. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01609>.

CARNEIRO, P C S (1998). **Novas metodologias de análise da adaptabilidade e estabilidade de comportamento**. 168 pp. Tese de Doutorado em Genética Vegetal, Universidade Federal de Viçosa.

CARNEIRO, V Q.; PRADO, A L.; CRUZ C D.; CARNEIRO, P C S.; NASCIMENTO, M.; CARNEIRO, J E S. **Fuzzy control systems for decision-making in cultivars recommendation**. Acta Scientiarum. Agronomy, v. 40, n. 1, p. 39314, 2018.

CARNEIRO, VINÍCIUS QUINTÃO. Universidade Federal de Viçosa, July, 2015. **Neural networks and fuzzy logic applied in common bean breeding**.

CARVALHO, C G P.; CRUZ, CD.; VIANA, JMS.; SILVA, D. **Cropp Breeding and Applied Biotechnology**, v. 2 (2):171-178.DOI:10.12702/1984-7033.v02n02a02.

CARVALHO, L P.; FARIAS, F J C.; MORELLO, C L.; TEODORO, P E. **Use of REML/BLUP methodology for selecting cotton genotypes with higher adaptability and productive stability**. Bragantia, v. 75, n. 3, p. 314-321, 2016. Available from: <<https://doi.org/10.1590/1678-4499.275>>. Accessed: Nov. 2, 2021. doi: 10.1590/1678-4499.275.

CASILLAS, J.; CORDÓN, O.; TRIGUERO, F.H.; MAGDALENA, L. 2013. **Interpretability issues in fuzzy modeling** (Vol. 128). Springer.

CASTRO, C E C.; SILVA, P H M.; ARAÚJO, M J, MIRANDA, A C.; MORAES, M L T.; PAULA, R C. (2018). **Adaptability, stability and productivity of Eucalyptus grandis progênies**. Scientia Forestalis Piracicaba, v. 46, n. 118, p. 157-166. DOI:10.18671/scifor.v46n118.02.

CELMELI, T.; SARI, H.; CANCI, H. (2018). **Agronomy** 8(9): 1-9. 10.3390/agronomy8090166.

CICHY, K A.; FERNANDEZ, A.; KILIAN, A.; KELLY, J D.; GALEANO, C H.; SHAW, S.; BRICK, M.; HODKINSON, D.; TROXTELL, E. **QTL analysis of canning quality and color retention in black beans (*Phaseolus vulgaris* L.)**. *Molecular breeding*.v. 33, no. 1 p. 139-154, 2014.

COELHO, C G.; OLIVEIRA, L S G.; BERNARDES, L. **Melhoramento do feijoeiro no Brasil: uma revisão de literatura**. In: *Ciência que aproxima ciência que liberta*, XXI, 2017, São José dos Campos. Anais...São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba, 2017. Disponível em: [http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2017/anais/arquivos/RE\\_0869\\_1360\\_01.pdf](http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2017/anais/arquivos/RE_0869_1360_01.pdf). Acesso em: 22 de abril de 2020

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Perspectivas para a agropecuária**. v. 6, safra 2018/2019. Brasília, 2018.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento. Boletim da safra de grãos: 4º levantamento: safra 2020/21**. Available at: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Accessed on: Mar. 12 2021.

CREVELARI, J A.; PEREIRA, M G.; AZEVEDO, F H V.; VIEIRA, R A M. Genetic improvement of silage maize: predicting genetic gain using selection indexes and best linear unbiased prediction. *Revista Ciência Agronômica*, v. 50, p. 197-204, 2019.

CRUZ, C D.; CARNEIRO, P C S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 2003. V.2, 585p.

CRUZ, C D.; REGAZZI, A J.; CARNEIRO, P C S. **Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético**. Editora UFV, 2012.vol 1,514p.

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

CUNHA, W G.; RAMALHO, M A P.; ABREU, A F B. **Selection aiming at upright growth habit common bean with carioca type grains**. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v.5, n. 4, p. 379-386, 2005.

DA SILVA JÚNIOR, A C.; DA SILVA, M J.; DA COSTA, W G.; SOUSA, I C.; CRUZ, C D; NASCIMENTO, M.; SOARES, P C. **Application of fuzzy logic for adaptability and stability studies in flood-irrigated rice (*Oryza sativa*)**. *Plant Breed*. 2021;140:1002–1010. DOI: 10.1111/pbr.12973.

DA SILVA, L M.; GONCALVES, R M.; FERREIRA, LM.; SILVA, E J A. **Estado da arte dos fundamentos e ideias da lógica fuzzy aplicada as ciências e tecnologia**. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 7, n. 3, p. 149, 2019.

DI PIERO, R M.; GARDA, M. V. **Quitossana reduz a severidade da antracnose e aumenta a atividade de glucanase em feijoeiro-comum**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, vol. 43, num. 09, p.1121-1128, 2008.

DIIL, R P. **Análise de Rentabilidade de empresas: uma abordagem baseada na lógica nebulosa**. 2005. 157 f. Dissertacao (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianopolis, 2015.

EBERHART, S A.; RUSSELL, W. A. **Stability Parameters for Comparing Varieties 1** . Crop Science, v. 6, n. 1, p. 36–40, 1966.

EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. **Dados conjunturais da produção de feijão comum (Phaseolus vulgaris L.) e caupi (Vigna unguiculata (L.) Walp) no Brasil (1985 a 2019): área, produção e rendimento**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2020. Disponível em: <<http://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm>>. Acesso 02-03-2021.

EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. **Dados conjunturais da produção de feijão comum (Phaseolus vulgaris L.) e caupi (Vigna unguiculata (L.) Walp) no Brasil (1985 a 2022): área, produção e rendimento**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2022. Disponível em: <<http://www.cnpaf.embrapa.br/socioeconomia/index.htm>>. Acesso em: 22 de Agosto de 2023.

FARIA, L C.; MELO, P G S.; PEREIRA, H S.; WENDLAND, A.; BORGES, S F.; PEREIRA FILHO, D J L C.; CALGARO M.; MELO, L C. **Genetic progress during 22 years of black bean improvement**. Euphytica, v. 199, n. 3, p. 261- 272, 2014.

FEHR, W R. **Principles of cultivar development. Theory and technique. v. 1. Theory and technique; v.2. Crop species**. New York.

FERRAUDO, G.; PERECIN, D. (2014). **Mixed Model, AMMI and Eberhart-Russel Comparison via Simulation on Genotype × Environment Interaction Study in Sugarcane**. *Applied Mathematics*, **5**, 2107-2119. doi: 10.4236/am.2014.514205.

FERREIRA, A W.; SARMENTO, P H L. **Feijão: Desenvolver, validar e transferir soluções tecnológicas para garantir a sustentabilidade, diminuir riscos de produção e aumentar a competitividade da cultura do feijão-comum cultivados em primeira, segunda e em terceira safra**. Santo Antônio do Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1p., 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/arroz-e-feijao/inovacao-tecnologica/feijao>. Acesso em: 14 jul. 2021.

FOLLMANN, D N.; SOUZA, V Q D.; CARGNELUTTI FILHO, A.; DEMARI, G H.; NARDINO, M.; OLIVOTO, T.; CARVALHO, I R.; SILVA, A D B.; MEIRA, D.; MEIER, C. **Agronomic performance and genetic dissimilarity of second-harvest soybean cultivars using REML/BLUP and Gower s algorithm**. *Bragantia*, v. 78, p. 197-207, 2019.

GANGA, G M D.; CARPINETTI, L.; POLITANO, P R. **Gestão do desempenho em cadeias de suprimento usando lógica Fuzzy**. *Gestao & Produção*, v. 18, p. 755-774, 2011.

GOMEZ, D.; SELVARAJ, M G.; CASAS, J.; MATHIYAZHAGAN, K.; RODRIGUEZ, M.; ASSEFA, T.; MLAKI, A.; NYAKUNGA, G.; KATO, F.; MUKANKUSI, C.; GIRMA, E.; MOSQUERA, G.; ARREDONDO, V.; ESPITIA, E. **Advancing common bean (Phaseolus vulgaris L.) disease detection with YOLO driven deep learning to enhance agricultural AI**. *Scientific Reports* | (2024) 14:15596 | <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66281-w>.

HENDERSON, C R. Best Linear Unbiased Estimation and Prediction under a Selection Model. *Biometrics*, v. 31, n. 2, p. 423-447, 1975.

HU, N.; ZHENG, J.; LI, W.; SUO, Y. **Isolation, stability, and antioxidant activity of anthocyanins from *Lycium ruthenicum* Murray and *Nitraria tangutorum* Bobr of Qinghai-Tibetan plateau.** *Separation Science and Technology*. v. 49, no. 18, p. 2897-2906, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ESTATÍSTICA E GEOGRAFIA. (2020). **Sistema IBGE de Recuperação automática (SIDRA)**. [Accessed Mar.15,2022]. Available at: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1612>.

JANG, J S.; SUN, C T.; Mizutani, E. 2012. **Neuro-Fuzzy and Soft Computing – A computacional Approach to Learning and Machine Intelligence**. PHI Learning Private.

JÚNIOR, T J P.; VIEIRA, R F.; TEIXEIRA, H.; JUNIOR, M L.; WENDLAND, A. **Doenças do feijoeiro: estratégias integradas de manejo.** In: CARNEIRO, J. E.; JÚNIOR, T. J. P.; BOREM, A. Feijão: do plantio à colheita. Viçosa: Editora UFV, p. 270-299, 2015.

KELLER, G F.; LEAL DE SOUZA, A R.; FERNANDES, A M.; VELHO, C O. **Relevância do planejamento estratégico no processo decisório das empresas prestadoras de serviços contábeis: uma análise com o auxílio da lógica fuzzy.** *Rev. Iberoam. Estratég.* São Paulo v.18 n.4, pp. 598-614, Out-Dez. 2019.

L Aidig, F.; Piepho, H.; Rentel, D.; Drobek, M T U.; Huesken, A. **Breeding progress, variation, and correlation of grain and quality traits in winter rye hybrid and population varieties and national on-farm progress in Germany over 26 years.** *Theoretical and Applied Genetics*, 5: 981-998, 2017.

LEE, C C. 1990. **Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller.** I. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*. 20(2):404-418. DOI: 10.1109/21.5255.  
LEMOES, R C.; ABREU, A F B.; SOUZA, E A.; SANTOS, J B.; E RAMALHO, M A P. (2020). **A half century of a bean breeding program in the south and alto paranaíba regions of minas gerais.** *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 20, 1–8. <https://dx.doi.org/10.1590/1984-70332020v20n2c27>.

LIMA, D C.; ABREU A, F B.; FERREIRA, R A D C, RAMALHO, M A P. **Breeding common bean populations for traits using selection index.** *Scientia Agricola. Sci. Agric.* v.72, n.2, p.132-137, March/April 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0130>.

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, 1988.

LOPES, F S.; LEITE, M E.; PORTO, A C M.; MIGUEL, L A.; REIS, V O L.; SANTOS, J B. **Recurrent selection in common bean aiming at resistance to white mold in a greenhouse** *Crop Breeding and Applied Biotechnology*. v. 19, p. 95–101, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332019v19n1a13>.

MAMBRIN, R B.; RIBEIRO, N D.; STORCK L, DOMINGUES L S.; BARKER, K A. **Seleção de linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), Baseada em caracteres morfológicos, fenológicos e de produção.** Revista de Agricultura. v.90, n.2, p. 141 - 155, 2015

MAMDANI, E H.; ASSILIAN, S.1975. **An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller.** Int. J. Man. Mach. Stud. 7(1): 1–13.

MANICOBA, G G C. **Controle de temperatura do sistema de refrigeração a água de uma tocha de plasmática indutiva utilizando a lógica fuzzy.** 2013. 87 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

MAPA. Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Cultivar Web. **Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento.** Não paginado. Disponível em: [https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares\\_registradas.php](https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php). Acessado em: 19 mar 2022.

MAPA. Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Cultivar Web. **Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento.** Não paginado. Disponível em: [https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares\\_registradas.php](https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php). Acessado em: 09 julh 2024.

MARTINS, S M. **Estratégias de melhoramento do feijoeiro-comum para altos teores de ferro e zinco.** 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

MARTÍNEZ, C.; Xarris M.; & JORGE, L. (2020). **Effect of Instant Controlled Pressure-Drop on the Non-Nutritional Compounds of Seeds and Sprouts of Common Black Bean (*Phaseolus vulgaris* L.).** Molecules, 25(6), 1464. <https://doi.org/10.3390/molecules25061464>.

MATHWORKS, C. **Fuzzy logic Toolbox User's Guide R.** Natick Matwhworks, 2015.

MELO, L C.; DEL PELOSO, M J.; PEREIRA, H S.; FARIA, L C.; COSTA, J G.; DÍAZ, J L C.; RAVA, C A.; WENDLAND, A.; ABREU, A F B. **BRS Estilo: common bean cultivar with carioca grain, upright growth and high yield potential.** Crop Breeding and Applied Biotechnology, v. 10, n. 4, p. 377-379, 2010.

MENCALHA, J.; ANDRADE, D M.; APARECIDA, D S E.; CARNEIRO, P C DE S.; CARNEIRO, V Q.; CARNEIRO, J E DE S. **Potential parents of carioca bean for use in breeding aiming resistance to *Colletotrichum lindemuthianum*.** Agronomy Journal. 2022; 114:2159–2168. DOI: 10.1002/agj2.21067.

MENEZES JÚNIOR, J A N. Seleção recorrente no melhoramento de feijão vermelho. 2011. 70 f. Tese (**Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas**) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

MIRANDA, A C.; DE MORAES, M L T.; DA SILVA, P H M.; SEBBENN, A M. (2015). **Ganhos genéticos na seleção pelo método do índice multi-efeitos em progenies polinização livre de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden Genetic gain in the selection by**

**multi-effects index in open-pollinated progenies of Eucalyptus grandis Hill ex Maiden.** Scientia Florestalis, 45(105): 203-209.

MOURA, M M.; CARNEIRO, P C S.; CARNEIRO, J E S.; CRUZ, C D (**Potencial de caracteres na avaliação da arquitetura de plantas de feijão.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, 48: 417-425, 2013.

MUSHTAQ, Z.; SANI, S S.; HAMED, K.; ALI, A.; BELAL, S M.; NAQVI, A A. 2016. **Automatic Agricultural Land Irrigation System By Fuzzy Logic.** 3rd International Conference on Information Science and Control Engineering. DOI:10.1109/ICISCE.2016.190.

NARDINO, M.; SOUZA, V Q D.; FOLLMANN, D N.; CARVALHO, I R.; CARON, B O.; ZANETTI, D. **REML/BLUP para estimativa dos componentes de variância e valores genotípicos em genótipos de trigo.** Global Science and Tecnology, v. 9, n. 3, p. 1-8, 2016.

NAY, M M.; SOUZA, T O L P O.; RAATZ B, M C M.; VIDIGAL, M C G.; ABREU A F B.; MELO L C.; CORRALE, M A P A. **Review of Angular Leaf Spot Resistance in Common Bean.** Published in Crop Sci. 59:1376–1391 (2019). doi: 10.2135/cropsci2018.09.059.

NORVIG, P.; Russell, S. 2013. **Inteligência Artificial.** 3rd ed. CAMPUS, Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, D G.; ROCHA, M M.; DAMASCENO-SILVA, K J.; SÁ, F V.; LIMA, L R L.; RESENDE, M D V. **Genotypic gain with simultaneous selection of production, nutrition, and culinary traits in cowpea crosses and backcrosses using mixed models.** Genetics and Molecular Research, v. 16, p. 1-11, 2017b.

OLIVEIRA, G V.; CARNEIRO, P C DE S.; DIAS L, A D S.; CARNEIRO, J E D S.; CRUZ, C D. **Factor analysis in the environment stratification for the evaluation of common bean cultivars.** Crop Breeding and Applied Biotechnology 5:166-173, 2005.

OLIVEIRA, L S G.; DALVI, L P.; SOUZA, L C.; SILVA, J A.; SOARES, T C B. **Genetic diversity of recombinant inbred lines of Phaseolus vulgaris L.** Revista Ciência Agrônômica, Fortaleza, v. 52, n. 3, p. 1-9, 2021.

OLIVOTO, T.; NARDINO, M. (2021) **MGIDI: towards an effective multivariate selection in biological experiments.** Bioinformatics.

PADUA, P F.; PEREIRA, R.; ABREU, A F B. **Efficiency of a recurrent selection method to achieve resistance of common beans to Pseudocercospora griseola in a short period.** Ciência e Agrotecnologia, v. 45, p. e013421, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145013421>.

PANG, B.; BAI, S. 2013. **An integrated fuzzy synthetic evaluation approach for supplier selection based on analytic network process.** Journal of Intelligent Manufacturing. 24(1),163–174. DOI 10.1007/s10845-011-0551-3.

PAPADOPOULOS, A.; KALIVAS, D.; HATZICHRISTOS, T. 2011. **Decision support system for nitrogen fertilization using fuzzy theory.** Computers and Electronics in Agriculture, 78: 130–139. DOI: 10.1016/j.compag.2011.06.007.

PASSOS, A L P. **Mapeamento de locos de resistência ao crestamento bacteriano comum do feijoeiro (*Phaseolus Vulgaris L.*)**. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

PAULA, R G. **Modelos mistos na avaliação do potencial genético de populações e famílias de feijoeiro**. 2016. 46f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016.

PEREIRA, H S.; COSTA, A F.; MELO, L C.; DEL PELOSO, M J.; FARIA, L C.; WENDLAND, A. **Interação entre genótipos de feijoeiro e ambientes no Estado de Pernambuco: estabilidade, estratificação ambiental e decomposição da interação**. Semina. Ciências Agrárias (Online), v. 34, p. 2603-2614, 2013.

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

PIMENTEL, A J B.; GUIMARÃES, J F R.; SOUZA, M A D.; RESENDE, M D V D.; MOURA L M.; ROCHA, J R D A S D C.; RIBEIRO, G. 2014a. **Estimação de parâmetros genéticos e predição de valor genético aditivo de trigo utilizando modelos mistos**. Pesqui. Agropecu. Bras. v. 49, p. 882-890.

PIMENTEL, A J B.; RIBEIRO, G.; SOUZA, M A D.; MOURA, L.M.; ASSIS, J C D.; MACHADO, J C. **Comparação de métodos de seleção de genitores e populações segregantes aplicados ao melhoramento de trigo**. Bragantia, v. 72, p. 113-121, 2013.

PIRES, L P M.; RAMALHO, M A P.; ABREU, A F B.; FERREIRA, M C. **Recurrent mass selection for upright plant architecture in common bean**. Scientia Agricola, v. 71, n. 3, p. 240-243, 2014.

POLIZEL, A C.; JULIATTI, F C.; HAMAWAKI, O T.; HAMAWAKI, R L.; GUIMARÃES, S L. (2013). **Phenotypical adaptability and stability of soybean genotypes in the state of Mato Grosso**. Bioscience Journal 29: 910-920.

RAMALHO, M A P.; ABREU, A F B. **Obtenção de Cultivares**. In: CARNEIRO, J E S.; PAULA JÚNIOR, T J.; BORÉM, A. (Ed.). **Feijão do plantio a colheita**. 1. ed. Viçosa: UFV. 2015. p. 96-114.

RAMALHO, M A P.; ABREU, A F B.; SANTOS, J B. **Melhoramento de espécies autógamias**. In: NASS, L L.; VALOIS, A C C.; MELO, I S.; VALADARES-INGLIS, M C. (Eds.). Recursos genéticos e melhoramento de plantas. Rondonópolis: Fundação MT, 2001. p. 201-230.

RAMALHO, M A P.; SANTOS, J B.; ABREU, A F B.; NUNES, J A R. 2012. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamias**. 1.ed. Lavras: Ed. UFLA, 522p.

RAMALHO, M A P.; SANTOS, J B.; ZIMMERMANN, M J O. **Genética quantitativa em plantas autógamas; aplicações ao melhoramento do feijoeiro**. Goiânia: UFG, 1993. 271p.

RESENDE, M D V. (2016). **Software SELEGEN-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding**. Crop Breeding and Applied Biotechnology 16: 330-339.

RESENDE, M V.; RAMALHO, M A P.; GUILHERME, S R.; ABREU, A F B. **Multigeneration index in the within families bulk method for breeding of self-pollinated plants**. Crop Sci., 55 (2015a), pp. 1202-121.

REZENDE, MA.; PACHECO, M T B, SOLVA, V S N.; FERREIRA, T A P C. **Nutritional and protein quality of dry Brazilian beans (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Food Science and Technology, v. 38, p. 421-427, 2017.

RIBEIRO, N D.; KLÄSENER, G R.; MEZZOMO, H C.; POSSOBOM, M T D F.; STECKLING, S D M.; CASAGRANDE, C R. **Combined selection in beans for cycle, plant architecture and grain yield**. Bioscience Journal, 34:108-119, 2018a.

ROCHA, J R D A S D C.; MACHADO, J C.; CARNEIRO, P C S. (2017). **Multitrait index based on factor analysis and ideotype-design: proposal and application on elephant grass breeding for bioenergy**. Gcb Bioenergy, 10(1), 52-60.

ROCHA, R B.; RAMALHO A R.; TEIXEIRA, A L.; SOUZA, F D F.; CRUZ, C D. (2015). **Adaptabilidade e estabilidade da produção de café beneficiado em *Coffea canephora***. Ciência Rural 45, 1531-1537. DOI: 10.1590/0103-8478cr20141554.

ROSADO, A M.; ROSADO, T B.; ALVES, A A.; LAVIOLA, B G.; BHERING, L L. (2012) **Seleção simultânea de clones de eucalipto de acordo com produtividade, estabilidade e adaptabilidade**. Pesqui Agropecu Bras 47:964-971. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000700013>.

SANTANA, A S.; MARÇAL, T DE S.; SALVADOR, F V.; DE SOUZA, M.; DA SILVA, L M B.; DA SILVA, M B P.; PEIXOTO, M A A.; CARNEIRO, P C S.; CARNEIRO, J E S. **Analysis of advanced generation multistage field trials data in autogamous plant breeding: An evaluation in common Bean**. Crop Science. 2023; 63:1221–1233. DOI: 10.1002/csc2.20935.

SANTOS, FS.; JÚNIOR, A T A.; JÚNIOR, S P F.; RANGEL, R M.; PEREIRA, M G. 2007. **Predição de ganhos genéticos por índices de seleção na população de milho-pipoca UNB-2U sob seleção recorrente**. Bragantia, 66 (3):389-396.

SANTOS, P R.; COSTA, K D S.; NASCIMENTO, M R.; LIMA, T V.; SOUZA, Y P.; COSTA, A F.; SILVA, J W. (2018). **Simultaneous selection for yield, stability, and adaptability of carioca and black beans**. Pesqui Agropecu Bras 53:736-745. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000600010>.

SILVA JUNIOR, A C.; SIQUEIRA, M.; COSTA, W.; SOUSA, I.; CRUZ, C D.; NASCIMENTO, M.; SOARES, P. **Application of fuzzy logic for adaptability and stability**

**studies in flood-irrigated rice** (<sc>Oryza sativa </sc> ). Plant Breeding, n. April 2020, p. 1–9, 18 out. 2021a.

SILVA, G O.; CARVALHO, A D F.; VEIRA, J V.; BENIN, G. (2011). **Verificação da adaptabilidade e estabilidade de populações de cenoura pelos métodos AMMI, GGE Biplot e REML/BLUP**. Bragantia v.70, n.3, p.494-501. DOI:10.1590/S0006-87052011005000003.

SILVA, L C. **Estratégias de condução de populações segregantes no melhoramento genético do feijoeiro**. 67 p. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

SILVA, R R.; BENIN, GIOVANI.; DA SILVA, G O.; MARCHIORO, V S.; DE ALMEIDA, J L.; MATEI, GILVANI. **Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de trigo em diferentes épocas de semeadura, no Paraná**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.46, n.11, p. 1439-1447, 2011.

SIMÕES, M G.; SHAW, I S. 2007. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2nd ed. EDGARD BLUCHER, São Paulo.

SIMÕES, M G.; SHAW, I S. **Controle e modelagem Fuzzy**. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

SOARES, I O.; BRUZI, A T.; ZAMBIAZZI, E V.; GUILHERME, S R.; BIANCHI, M C.; SILVA, K B.; FRONZA, V.; TEIXEIRA, C M. (2017). **Stability and adaptability of soybean cultivars in Minas Gerais**. Genetics and Molecular Research 16: gmr16039730.

SOLTANI, A.; BELLO, M.; MNDOLWA, E.; SCHRODER, S.; MOGHADDAM, S. M.; OSORNO, J. M.; MIKLAS, P. N.; & MCCLEAN, P. E. (2016). **Targeted Analysis of Dry Bean Growth Habit: Interrelationship among Architectural, Phenological, and Yield Components**. *Crop Science*, 56(6), 3005-3015. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.02.0119>

SOUZA FILHO, B F.; FERNANDES, G M B.; ANDRADE, M J B.; ARAÚJO, G A A.; VIEIRA, C. (1991) Ouro Negro e Varre-Sai: **novas cultivares de feijão para o Estado do Rio de Janeiro**. Niterói: Pesagro-Rio. 2 p. (Pesagro-Rio. Comunicado técnico, 211).

SOUZA, T L P O.; PEREIRA, H.; FARIA, L C.; WENDLAND, A.; Da COSTA, J G C.; ABREU, A.; DIAS, J L C.; MAGALDI, M C S.; SOUZA, N P.; PELOSO, M J D.; MELO, L. **Cultivares de feijão comum da Embrapa e parceiros disponíveis para 2013**. Embrapa Arroz e Feijão-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2013.

SOUZA, Y P D.; SANTOS, P R D.; NASCIMENTO, M R.; COSTA, K D D S.; LIMA, T V.; OLIVEIRA, T R A D.; COSTA, A F D.; PEREIRA, H S.; SILVA, J W D. **Assessing the genotypic performance of carioca beans through mixed models**. *Ciência Rural*, v. 48, 2018.

STRECK, E A, MAGALHÃES JÚNIOR, A M.; AGUIAR, G A.; FACCHINELLO, P H K.; FAGUNDES, P R R (2019). **Genotypic performance, adaptability and stability in special**

**types of irrigated rice using mixed models.** Revista Ciência Agronômica, 50(1). DOI:10.5935/1806-6690.20190008.

SUGENO, M.; KANG, G T. 1988a. **Fuzzy modelling and control of multilayer incinerator.** Fuzzy Sets Syst. 25(2): 259–260.

SUGENO, M.; TANAKA, K. 1991. **Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system.** Fuzzy Sets Syst. 42(3): 315–334.

SUGENO, M.; YASUKAWA, T. **Fuzzy –logic-based approach to qualitative modeling.** IEEE Transactions on Fuzzy Systems, v.1, p. 7-31,1993.

SZARESKI, J I R.; KEHL, C K.; LEVIEN, A M, DA ROSA, T C.; BARBOSA, DEMARI, M H.; G H, PIMENTEL, J R, TROYJACK, C.; DE SOUZA V Q.; MARTINAZZO, E G.; VILLELA, F A.; PEDÓ, A T. **Phenotypic and predicted genetic approaches for genotype ranking of wheat seed yield in Brazil.** Genetics and Molecular Research, v. 17, n. 3, p. 1-13, 2018.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzyidentification of systems and its applications to modeling and control. **IEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v.15, p. 116-132,1985.

TORRES, F E.; TEODORO, P E.; RODRIGUES, E V A.; SANTOS A.; CORRÊA, A M.; CECCON, G (2016) **Simultaneous selection for cowpea (*Vigna unguiculata L.*) genotypes with adaptability.**

TRINDADE, T F H. Universidade Federal de Viçosa, junho de 2020. **Potencial de linhagens e populações de feijão preto oriundas do Programa de Seleção Recorrente da UFV.**

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

VALE, N M.; BARIL, L D.; OLIVEIRA, H M.; CARNEIRO, J E S, CARNEIRO, P C SOUZA.; DA SILVA F L. **Escolha de genitores quanto à precocidade e produtividade de feijão tipo carioca.** Pesq. agropec. bras., Brasília, v.50, n.2, p.141-148, fev. 2015. DOI: 10.1590/S0100-204X2015000200006.

VAN, E FA.; BUSTOS-KORTS, D V.; MALOSETTI, M. (2016). **What should students in plant breeding know about the statistical aspects of genotype x environment interactions?** Crop Science 56: 2119-2140.

VIEIRA, C.; BORÉM, A.; RAMALHO, M A P.; CARNEIRO, J E S. **Melhoramento do feijão.** In: BORÉM, A. Melhoramento de espécies cultivadas. 2. ed. Viçosa: UFV, 2005. p.301-392. VON ALTROCK, C. **Fuzzy Logic and neurofuzzy applications in business and finance.** New Jersey: Prentice Hall PTR, 1996. v.1, 400 p.

XU, ZHENWEN.; ZHANG, YICONG. **Analysis of physical health test results of College students using fuzzy logic as an evaluation method.** Rev Bras Med Esporte – Vol. 28, Nº 5 – Sep/Oct, 2022. DOI: [http://dx.doi.org/10.1590/1517-8692202228052021\\_0523](http://dx.doi.org/10.1590/1517-8692202228052021_0523).

ZADEH, L A. 1965. **Fuzzy sets**. *Inf. Control* 8(3): 338–353.

ZADEH, L A. 1983. **A computational approach to fuzzy q quantifiers in natural languages**. *Comput. Math. with Appl.* 9(1): 149–184.

ZADEH, L A. 1997. **Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic**. *Fuzzy Sets Syst.* 90(2): 111–127.

ZADEH, L A. 1999. **A theory of possibility distributions**. *Fuzzy Sets Syst.* 102(2): 135–155.

ZADEH, L A. 2004. **A note on web intelligence, world knowledge and fuzzy logic**. *Data Knowl. Eng.* 50(3 SPEC. ISS.): 291–304.

ZADEH, L A. 2008. **Is there a need for fuzzy logic** *Inf. Sci. (Ny)*. 178(13): 2751–2779.

ZADEH, L A. 1996. **Fuzzy logic equals Computing with words**. *Ieee Trans. Fuzzy Syst.* 4(2): 103-111. Available at <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=00493904>.

## **CAPÍTULO 2**

### **LÓGICA FUZZY APLICADA A SELEÇÃO DE LINHAGENS DE FEIJÃO PRETO**

## RESUMO

Cultivares de feijão preto altamente produtivas e com elevada qualidade comercial dos grãos é uma das principais demandas dos produtores, cerealistas e consumidores. A identificação de uma nova linhagem com estes atributos requer que estes genótipos sejam extensivamente avaliados em diferentes condições ambientais antes e durante os ensaios de valor de cultivo e uso. Assim, as linhagens devem ser selecionadas tanto na ótica de multicares quanto de multiambientes, principalmente para verificar se estas são adaptadas a diferentes condições de locais, anos e safras. Existem diversos métodos de análise para auxiliar na seleção de linhagens superiores. Entretanto, alguns não contemplam a interação genótipos por ambientes, seus resultados são de difícil interpretação e não tem a possibilidade de incorporar a experiência dos melhoristas na tomada de decisão. A lógica Fuzzy, por meio de controladores, que são sistemas de tomada de decisão desenvolvidos com base no conhecimento de especialistas, pode tornar o processo de seleção de linhagens mais simples e eficaz. Portanto, objetivo deste trabalho foi empregar um controlador fuzzy para auxiliar na seleção de linhagens de feijão preto com elevado potencial produtivo e qualidade comercial de grãos. Um conjunto de 162 linhagens e sete testemunhas de feijão preto foram avaliadas quanto a produtividade e aspecto comercial dos grãos em dois experimentos conduzidos nas safras das águas de 2022 e seca de 2023. O delineamento adotado nestes experimentos foi de látice quadrado triplo (13 x 13). Os dados foram submetidos a análises individuais e conjunta de variância/deviance para ambos os caracteres. Houve efeito significativo de linhagens nas análises individuais, assim como efeitos de genótipos e de interação linhagens por ambientes nas análises conjuntas para ambos os caracteres. Um controlador fuzzy foi implementado considerando as médias ajustadas para auxiliar na seleção das linhagens quanto a produtividade e aspecto dos grãos sob ótica de interação linhagens por ambientes. As variáveis de entrada deste controlador foram as avaliações de cada característica em cada safra, enquanto que a variável de saída foi construída como um índice que variou de 0 a 100, composto por quatro grupos de linhagens: (1) não selecionados; (2) intermediário; (3) ótimo e (4) ideal. Esta abordagem fuzzy permitiu discriminar as linhagens de feijão preto avaliadas em condição de multicares em multiambientes. Foram selecionadas 16 linhagens de feijão preto com valores de índice fuzzy igual ou superior a 50, que indica que estes são linhagens ótimas ou ideais quanto aos caracteres avaliados. Dentre estas, destaca-se a linhagem UFLAP 147 por apresentar desempenho igual ou superior à cultivar BRS FP 403 quanto a produtividade e aspecto comercial dos grãos.

**Palavras chave:** *Phaseolus vulgaris* L.; melhoramento genético; inteligência computacional.

## 5 INTRODUÇÃO

O feijão constitui a principal componente da dieta da população brasileira (Chimenez-Franzon *et al.*, 2022). O grão do tipo carioca é o mais plantado, atingindo aproximadamente 70% da produção nacional (Melo *et al.*, 2010; Borém; Carneiro, 2015), enquanto que o grão do tipo preto é o segundo mais plantado ocupando 20% (Pereira *et al.*, 2012). Um dos motivos para a pequena produção de feijão do tipo preto em comparação com o carioca no Brasil, é o preço pago pelo produto, em que na maioria das vezes é inferior ao preço pago pelo feijão carioca (Bolsinha, 2020). Além disso, há dificuldade na escolha de cultivares mais adaptadas aos diferentes sistemas e ambientes de produção, devido ao número reduzido de cultivares disponíveis aos produtores quando comparado com o feijão carioca (Souza *et al.*, 2013).

Novas cultivares de feijão preto devem ser produtivas, adaptadas a diferentes condições ambientais, possuir plantas com arquitetura ereta, boa qualidade dos grãos (tecnológica, nutricional e comercial) e resistência a estresses bióticos e abióticos (Amabiele *et al.*, 2018; Barili *et al.* 2015; Tsutsumi *et al.*, 2015). Este é um dos motivos pelos quais a seleção de linhagens no feijoeiro é realizada de forma simultânea e em condição de multiambientes. Neste contexto a seleção por meio de índices tem sido empregada de forma rotineira pelos programas de melhoramento do feijoeiro (Yan *et al.*, 2019). A natureza quantitativa dos caracteres de importância, correlações em sentidos indesejados entre estes caracteres e a presença de interação genótipos por ambientes são os principais desafios observados pelos programas de melhoramento do feijoeiro na seleção acurada de linhagens.

Metodologias de índice de seleção tem sido empregadas para auxiliar na seleção de genótipos superiores em condição de multicares em multiambientes (Rocha *et al.*, 2017, Lima *et al.*, 2012, Olivoto & Nardino, 2021, Resende *et al.*, 2015). Problemas devido a multicolinearidade tem afetado no emprego destas metodologias proporcionando redução na acurácia da seleção (Laidig *et al.*, 2017). Outro problema envolvendo alguns índices de seleção é a complexidade da interpretação dos parâmetros obtidos nestas metodologias. Isso também tem sido observado ao empregar metodologias de adaptabilidade e estabilidade. Por isso, muitos dos programas de melhoramento não tem utilizado alguns índices de seleção. Novas abordagens baseadas em inteligência computacional tem potencial para contornar estes desafios e proporcionar aos programas de melhoramento maior acurácia de seleção.

A lógica fuzzy proposta por Zadeh (Zadeh, 1965, 1983, 1996, 1997, 1999, 2004, 2008), também conhecida como lógica nebulosa ou teoria das possibilidades é a área da inteligência computacional inspirada na forma de raciocínio humano, que é baseado em aproximações e incertezas. Esta técnica provê um método de traduzir expressões verbais, que são imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em valores numéricos (Simões; Shaw, 2007). Estes princípios são empregados para o desenvolvimento de controladores fuzzy, que são sistemas de tomada de decisão desenvolvidos por especialistas com ampla experiência em problemas em diferentes áreas do conhecimento. Por isso, uma das vantagens destes controladores é a incorporação de informações úteis na tomada de decisão em problemas reais. Esta possibilidade muitas das vezes é desconsiderada. Exemplo disso ocorre durante a seleção de genótipos superiores no melhoramento de plantas, que não incorpora o conhecimento de melhoristas experientes nas análises de índices de seleção.

Os controladores fuzzy são amplamente utilizados em diversas áreas como robótica, controle de fluxo de caixa, análise de risco (Dill, 2005), controle de estoques (Von Altrock, 1996), controle de qualidade (Maniçoba, 2013) e automação industrial (Simões & Shaw, 2007). Entretanto, poucas são as propostas de emprego desta abordagem no melhoramento de plantas. Carneiro *et al.* (2020) propuseram a utilização de controladores fuzzy como ferramenta para identificação do comportamento de linhagens de feijão. Estes autores também demonstraram que uma das grandes vantagens dessa abordagem é a possibilidade de associar resultados de diferentes métodos estatísticos para realizar tomadas de decisão. Diante das limitações dos métodos tradicionais, a lógica fuzzy vem ganhando espaço e apresenta grande potencial, dado que permite incorporar o conhecimento de melhoristas experientes nas tomadas de decisão principalmente na etapa de seleção de linhagens em condição de multicares e multiambientes. Portanto, o objetivo deste trabalho foi empregar um controlador fuzzy para auxiliar na seleção de linhagens de feijão preto com elevado potencial produtivo e qualidade comercial de grãos.

## 6 MATERIAL E MÉTODOS

### 6.1 Condução dos experimentos

No presente do trabalho foram avaliadas 162 linhagens oriundas do primeiro ciclo de seleção recorrente do programa de melhoramento da Universidade Federal de Viçosa cedidas à Universidade Federal de Lavras. Estas linhagens juntamente com as sete testemunhas de feijão preto (Ouro Negro, BRS Esplendor, BRS Esteio, IPR Tuiuiú, BRS FP 403, IPR Uirapuru e IPR Urutau) foram avaliadas em látice quadrado triplo 13x13, nas safras de águas 2022 e seca de 2023 no Centro de Desenvolvimento Científico e Tecnológico da Universidade Federal de Lavras situado a 919 metros de altitude, 21°14' de latitude Sul e 45° de longitude Oeste. As parcelas dos experimentos foram constituídas por duas linhas de dois metros espaçadas em 0,60m. A densidade de plantio foi de 15 sementes por metro linear. Os tratos culturais adotados nos experimentos foram realizados de acordo com as recomendações técnicas para a cultura do feijoeiro (Carneiro *et al.*, 2015).

As linhagens foram avaliadas quanto a produtividade (PG) e aspecto comercial de grãos (AG). A PG foi obtida pela produção total da parcela que foi convertida em kg ha<sup>-1</sup>. A avaliação do aspecto comercial de grãos foi realizada com auxílio de escala de notas (Tabela 4) adaptada de Ramalho *et al.* (1998) para o grupo comercial preto.

**Tabela 1** - Descrição da escala de notas de aspecto de grãos do tipo carioca, adaptada de Ramalho et al. (1998) para feijão preto.

Nota	Especificação
1	Grão padrão tipo preto, sem presença de brilho, não achatado
2	Grão tipo preto com deficiência em uma das características mencionadas no padrão
3	Grão tipo preto com deficiência em duas características mencionadas no padrão
4	Grão tipo preto com deficiência em três características mencionadas no padrão
5	Grão fora do padrão preto

**Fonte:** Ramalho et al. (1998).

### 6.2 Análises Estatísticas

Os dados das linhagens quanto a PG, AG foram submetidos à análise individual de variância conforme o modelo linear misto apresentado na equação (1):

$$\mathbf{y} = \mathbf{1}\boldsymbol{\mu} + \mathbf{X}_r\boldsymbol{\tau}_r + \mathbf{X}_l\boldsymbol{\tau}_l + \mathbf{Z}_b\mathbf{u}_b + \mathbf{e} \quad (1)$$

em que  $\mathbf{y}^{(N \times 1)}$  é o vetor de observações fenotípicas, no qual  $N$  é o número de observações fenotípicas;  $\boldsymbol{\mu}$  é o intercepto associado a um vetor de uns  $\mathbf{1}^{(N \times 1)}$ ;  $\boldsymbol{\tau}_r^{(r \times 1)}$  é o vetor de efeitos fixos de repetições associado à matriz de incidência  $\mathbf{X}_r^{(N \times r)}$ , em que  $r$  é o número de repetições;  $\boldsymbol{\tau}_l^{(l \times 1)}$  é o vetor de efeitos fixos de linhagens associado à matriz de incidência  $\mathbf{X}_l^{(N \times l)}$ , em que  $l$  é o número de linhagens;  $\mathbf{e}$  é o vetor de erros aleatórios, com  $\mathbf{e} \sim N(\mathbf{0}, \sigma_e^2 \mathbf{I}_N)$ , em que  $\mathbf{I}_N$  é uma matriz identidade e  $\sigma_e^2$  é o componente de variância residual;  $\mathbf{u}_b$  é o vetor de efeitos aleatórios de blocos dentro de repetições associado à matriz de incidência  $\mathbf{Z}_b^{(N \times b)}$ , com  $\mathbf{u}_b \sim N(\mathbf{0}, \sigma_b^2 \mathbf{I}_b)$ , em que  $b$  é o número de blocos;  $\sigma_b^2$  é o componente de variância residual do bloco,  $\mathbf{I}_b$  é uma matriz identidade.

O coeficiente de variação experimental (CV) para PG avaliada em cada experimento foi estimado conforme equação (2):

$$CV(\%) = 100 * \frac{\sqrt{\sigma_e^2}}{\bar{y}}, \quad (2)$$

em que,  $\bar{y}$  a média geral do experimento. Já o CV para AG foi estimado por meio da expressão sugerida por Anjos *et al.* (2019) descrita na equação (3):

$$CV(\%) = 100 * \frac{\sqrt{\sigma_e^2}}{|\bar{y} - NI|}, \quad (3)$$

em que, NI é o valor numérico da nota atribuída ao fenótipo indesejável (Maior nota).

As acurácias para todos os caracteres avaliados em cada experimento foram estimadas conforme equação (4):

$$r_{\hat{g}g} = \sqrt{1 - (1/F)}, \quad (4)$$

em que,  $F$  é o valor da estatística F da análise de variância.

A análise de variância conjunta para cada um dos caracteres foi realizada segundo modelo descrito na equação (5):

$$\mathbf{y} = \mathbf{1}\boldsymbol{\mu} + \mathbf{X}_s\boldsymbol{\tau}_s + \mathbf{X}_r\boldsymbol{\tau}_r + \mathbf{X}_l\boldsymbol{\tau}_l + \mathbf{X}_{ls}\boldsymbol{\tau}_{ls} + \mathbf{Z}_b\mathbf{u}_b + \mathbf{e} \quad (5)$$

em que  $\mathbf{y}^{(N \times 1)}$  é o vetor de observações fenotípicas, no qual  $N$  é o número de observações fenotípicas;  $\boldsymbol{\mu}$  é o intercepto associado a um vetor de uns  $\mathbf{1}^{(N \times 1)}$ ;  $\boldsymbol{\tau}_s^{(s \times 1)}$  é o vetor de efeitos fixos de safras associado à matriz de incidência  $\mathbf{X}_s^{(N \times s)}$ , em que  $s$  é o número de safras;  $\boldsymbol{\tau}_r^{(r \times 1)}$  é o vetor de efeitos fixos de repetições dentro de safras associado à matriz de incidência  $\mathbf{X}_r^{(N \times r)}$ , em que  $r$  representa a soma do número de repetições em todas as safras;  $\boldsymbol{\tau}_l^{(l \times 1)}$  é o vetor de

efeitos fixos de linhagens associado à matriz de incidência  $\mathbf{X}_l^{(N \times l)}$ , em que  $l$  é o número de linhagens;  $\boldsymbol{\tau}_{ls}^{(ls \times 1)}$  é o vetor de efeitos fixos da interação de linhagens por safras associado à matriz de incidência  $\mathbf{X}_{ls}^{(N \times ls)}$ ;  $\mathbf{u}_b$  é o vetor de efeitos aleatórios de blocos dentro de repetições dentro de safras associado à matriz de incidência  $\mathbf{Z}_b^{(N \times b)}$ , com  $\mathbf{u}_b \sim N(\mathbf{0}, \sigma_b^2 \mathbf{I}_b)$ , em que  $b$  representa o somatório do número de blocos em todas as safras,  $\mathbf{I}_b^{(b \times b)}$  é uma matriz identidade associada a estrutura de (co)variância de blocos e  $\sigma_b^2$  é o componente de variância de blocos;  $\mathbf{e}$  é o vetor de erros aleatórios, com  $\mathbf{e} \sim N(\mathbf{0}, \sigma_e^2 \mathbf{I}_N)$ , em que  $\mathbf{I}_N^{(N \times N)}$  é uma matriz identidade associada a estrutura de (co)variância residual e  $\sigma_e^2$  é o componente de variância residual.

A significância dos efeitos fixos tanto nas análises individuais quanto conjunta foi verificada por meio do teste de Wald (Satterthwaite, 1946), enquanto que para os efeitos aleatórios a significância foi verificada por meio do teste de razão de verossimilhança (Patterson & Thompson, 1997).

As médias ajustadas das linhagens ( $\mathbf{y}_l$ ) para cada um dos caracteres em cada experimento foram obtidas por meio das combinações lineares apresentadas na equação (6), na qual  $\boldsymbol{\tau}^T = (\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\tau}_r, \boldsymbol{\tau}_l)^T$  nas análises individuais ou  $\boldsymbol{\tau}^T = (\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\tau}_s, \boldsymbol{\tau}_r, \boldsymbol{\tau}_l, \boldsymbol{\tau}_{ls})^T$  na análise conjunta.

$$\mathbf{y}_l = \mathbf{L}_l \boldsymbol{\tau} \quad (6)$$

em que:  $\mathbf{y}_l^{(l \times 1)}$  é o vetor de médias ajustadas das linhagens;  $\mathbf{L}_l^{(l \times N\tau)}$  é uma matriz de coeficientes de combinações lineares para estimar as médias ajustadas das linhagens, em que  $N\tau$  o número de efeitos no vetor  $\boldsymbol{\tau}$ .

Os erros médios de comparação das linhagens em relação a melhor testemunha BRS FP 403 tanto para PG quanto para AP foram estimados para cada variável em cada um dos experimento, conforme equações (7, 8 e 9).

$$C_{i \text{ BRS FP403}} = \bar{y}_{i \bullet} - \bar{y}_{\text{BRS FP403} \bullet} \quad (7)$$

$$\text{var}(C_{i \text{ BRS FP403}})^{1/2} = \text{var}(\bar{y}_{i \bullet} - \bar{y}_{\text{BRS FP403} \bullet})^{1/2} \quad (8)$$

$$\text{var}(\bar{y}_{i \bullet} - \bar{y}_{\text{BRS FP403} \bullet}) = \text{var}(\bar{y}_{i \bullet}) + \text{var}(\bar{y}_{\text{BRS FP403} \bullet}) - 2 \times \text{cov}(\bar{y}_{i \bullet}, \bar{y}_{\text{BRS FP403} \bullet}) \quad (9)$$

em que:  $C_{i \text{ BRS FP403}}$  é o contraste entre a média da linhagem  $i$  ( $\bar{y}_{i \bullet}$ ) e da testemunha BRS FP 403 ( $\bar{y}_{\text{BRS FP403} \bullet}$ ),  $\text{var}()$  representa a operação de variância e  $\text{cov}()$  representa a operação de covariância. A estimação do desvio padrão do contraste  $C_{i \text{ BRS FP403}}$  requer as variâncias e covariâncias associadas aos termos do contraste (7), cujos componentes podem ser facilmente obtidos por meio da expressão (10).

$$\text{var}(\mathbf{L}_l \boldsymbol{\tau}) = \mathbf{L}_l \mathbf{C}^{-1} \mathbf{L}_l^T \quad (10)$$

em que:  $\mathbf{C}^{-1}$  é a matriz de coeficientes do sistema de equações de modelos mistos de Henderson (1959).

### 6.3 Controlador fuzzy aplicado a seleção de linhagens

A seleção simultânea das linhagens foi realizada com auxílio de um controlador fuzzy que foi desenvolvido com as variáveis de entrada PG e AG mensuradas nas avaliações das linhagens nas safras das águas de 2022 e seca de 2023. PG e AG em cada safra foram consideradas como variáveis fuzzy, contendo três grupos: médias inferiores à testemunha (MINT), médias iguais às testemunhas (MIGT) e médias superiores à testemunha (MSUT). A testemunha BRS FP 403 foi adotada como referência neste trabalho devido a sua elevada produtividade e alta qualidade comercial dos grãos.

As pertinências aos grupos MINT e MSUT de cada variável fuzzy foram representados por uma função sigmoide, conforme equação (11):

$$y = \frac{1}{1+e^{-c(x-b)}} \quad (11)$$

em que,  $x$  é o vetor de dados da variável fuzzy de entrada;  $b$  é parâmetro de deslocamento horizontal, que corresponde ao valor  $x$  no qual a pertinência representada na função é igual a 0,50 e  $c$  é o parâmetro de inclinação da função sigmoide. Os grupos MIGT das variáveis fuzzy PG e AG foram representados pelo produto das duas sigmoides apresentadas nas equações 12 e 13.

$$f_1(x) = \frac{1}{1+e^{-c_1(x-b_1)}} \quad (12)$$

$$f_2(x) = \frac{1}{1+e^{-c_2(x-b_2)}} \quad (13)$$

em que,  $x$  é o universo das características, ou seja, vetor de dados da variável fuzzy de entrada;  $b_1$  é parâmetro de deslocamento horizontal, que corresponde ao valor  $x$  no qual a pertinência representada na primeira função sigmoide é igual a 0,50 e  $c_1$  é o parâmetro de inclinação da primeira função sigmoide. Já  $b_2$  é parâmetro de deslocamento horizontal, que corresponde ao valor  $x$  no qual a pertinência representada na segunda função sigmoide é igual a 0,50 e  $c_2$  é o parâmetro de inclinação da segunda função sigmoide.

Os universos ( $x$ ) das características PG em cada safra variaram entre as menores e maiores médias observadas na respectiva safra (Figura 1). Já o universo do aspecto de grãos em ambas as safras variaram de 1 a 5, que são os valores extremos observados na escala de notas proposta por Ramalho *et al.* (1998). Os valores dos parâmetros de deslocamento ( $b, b_1, b_2$ ) das funções sigmoides de todas as variáveis de entrada do controlador fuzzy foram determinados por meio do intervalo de médias que foram consideradas iguais à testemunha para cada característica. O limite inferior deste intervalo foi a média da testemunha BRS FP 403 menos o

erro médio de comparação das linhagens com esta testemunha. Já o limite superior foi a média desta testemunha somada a este erro médio (Tabela 2). Os valores dos parâmetros de inclinação das funções sigmoides também estão descritos nesta tabela.

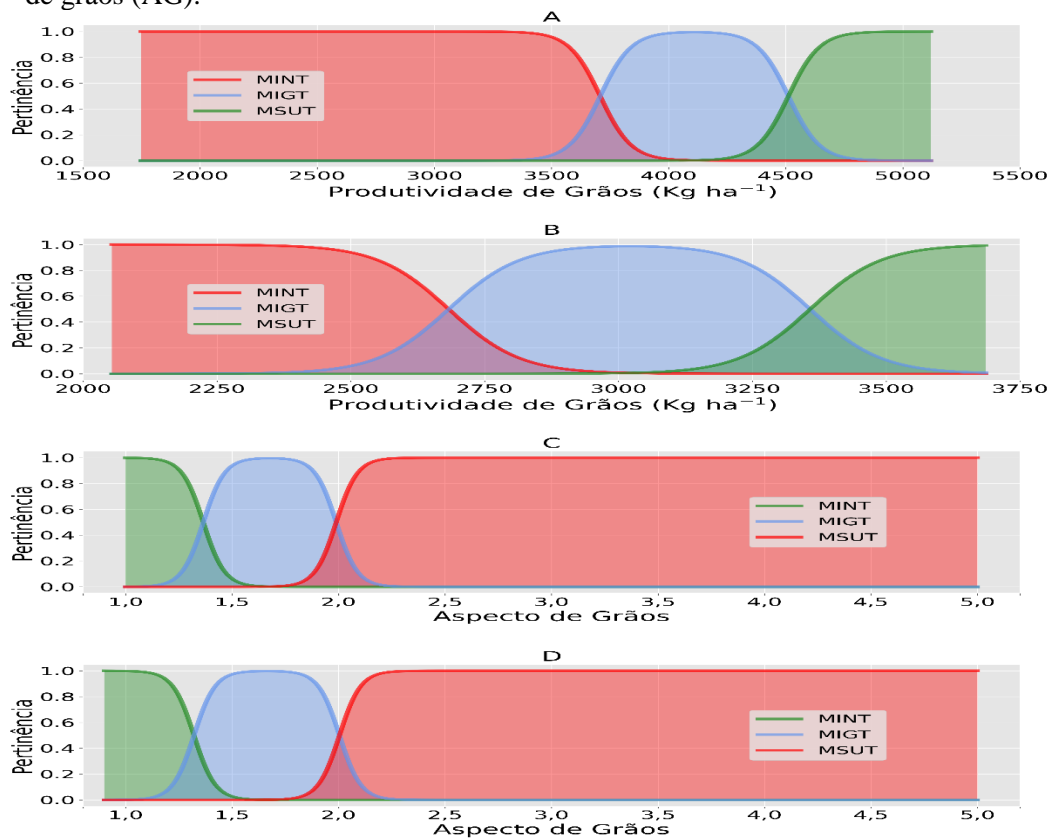
**Tabela 2** - Parâmetros das funções sigmoides empregadas para representar os grupos médias inferiores à testemunha (MINT), médias iguais às testemunhas (MIGT) e médias superiores testemunha (MSUT) das variáveis produtividade e aspecto dos grãos nas safras das águas de 2022 e seca de 2023.

VAR <sup>+</sup>	x*	MINT		MIGT				MSUT	
		b	c	b <sub>1</sub>	c <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	c <sub>2</sub>	b	c
PG <sub>22</sub>	1747,51 - 5117,31	3707,84	-0,015	3707,84	0,015	4511,39	-0,015	4511,39	0,015
PG <sub>23</sub>	2053,86 - 3684,70	2683,02	-0,015	2683,02	0,015	3358,07	-0,015	3358,07	0,015
AG <sub>22</sub>	1,00 - 5,00	1,36	-20	1,36	20	1,99	-20	1,99	20
AG <sub>23</sub>	1,00 - 5,00	1,32	-20	1,32	20	2	-20	2	20

VAR<sup>+</sup>: Variáveis fuzzy; PG<sub>22</sub>: produtividade de grãos na safra das águas de 2022; PG<sub>23</sub>: produtividade de grãos na safra da seca de 2023; AG<sub>22</sub>: aspecto de grãos na safra das águas de 2022; AG<sub>23</sub>: aspectos de grãos na safra da seca de 2023. x\*: universo das variáveis fuzzy de entrada.

Fonte: Do autor (2024).

**Figura 5** – Grupo de médias inferiores inferiores (MINT), iguais (MIGT) e superiores (MSUT) à testemunha BRS FP 403 das variáveis fuzzy de entrada produtividade de grãos (PG) e aspecto de grãos (AG).



Fonte: Do autor (2024).

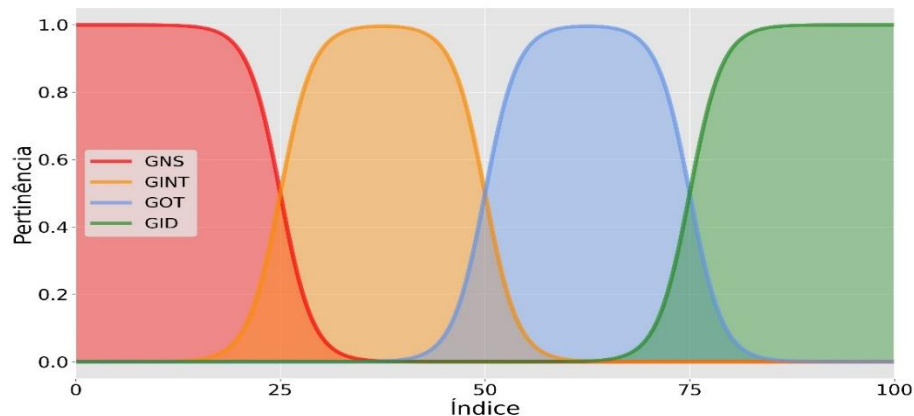
O sistema de inferência de Mandani (Mandani; Assilian, 1975) foi adotado no controlador fuzzy. Portanto, foi desenvolvida uma variável fuzzy de saída deste controlador denominada Índice que variou de 0 a 100, contendo 4 grupos de genótipos: não selecionados, intermediários, ótimos e ideais. Os grupos de genótipos não selecionados e ideais foram representados por funções sigmóides enquanto que os grupos intermediários e ótimos foram representados pela combinação de duas funções sigmóides (Tabela 3, Figura 6)

**Tabela 3** - Parâmetros das funções de pertinência empregadas para representar os grupos de genótipos não selecionados, intermediários, ótimos e ideais da variável de saída índice.

Grupos	Parâmetros	Valores
Não selecionados	$b$	25
	$c$	-0.5
Intermediários	$b_1$	25
	$c_1$	0.5
	$b_2$	50
	$c_2$	-0.5
Ótimos	$b_1$	50
	$c_1$	0.5
	$c_2$	-0.5
Ideais	$b$	75
	$c$	0.5

Fonte: Do autor (2024).

**Figura 6** - Grupos de genótipos não selecionados (GNS), intermediários (GINT), ótimos (GOT) e ideais (GID) da variável de saída denominada Índice do controlador fuzzy.



Fonte: Do autor (2024).

A relação entre as variáveis fuzzy de entrada com a variável de saída foi determinada por 81 regras que combinaram cada grupo de cada variável com os demais grupos das outra

variáveis (Tabela 4). Em cada uma das regras foi adotado o operador lógico de intersecção (E), ou seja, a regra 1 foi assim escrita: Se a média de uma linhagem apresentar PG<sub>22</sub> alocada no grupo MSUT (E) PG<sub>23</sub> alocada no grupo MSUT (E) AG<sub>22</sub> alocada no grupo MSUT (E) AG<sub>23</sub> alocada no grupo MSUT, esta linhagem será alocada no grupo de não selecionados da variável de saída (Índice). O operador de mínimo foi adotado para representar o operador de intersecção (E) nas operações matemática fuzzy durante a etapa de implicação.

**Tabela 4** - Regras adotadas no controlador Fuzzy para relacionar as variáveis de entrada com a variável de saída.

(Continua)

Regras	PG <sub>22</sub> <sup>+</sup>	PG <sub>23</sub>	AG <sub>22</sub>	AG <sub>23</sub>	ÍNDICE
1	MSUT	MSUT	MSUT	MSUT	Não selecionados
2	MINT	MSUT	MSUT	MSUT	Não selecionados
3	MIGT	MSUT	MSUT	MSUT	Não selecionados
4	MSUT	MINT	MSUT	MSUT	Não selecionados
5	MINT	MINT	MSUT	MSUT	Não selecionados
6	MIGT	MINT	MSUT	MSUT	Não selecionados
7	MSUT	MIGT	MSUT	MSUT	Não selecionados
8	MINT	MIGT	MSUT	MSUT	Não selecionados
9	MIGT	MIGT	MSUT	MSUT	Não selecionados
10	MINT	MINT	MINT	MSUT	Não selecionados
11	MINT	MINT	MIGT	MSUT	Não selecionados
12	MINT	MINT	MSUT	MINT	Não selecionados
13	MINT	MINT	MINT	MINT	Não selecionados
14	MINT	MINT	MIGT	MINT	Não selecionados
15	MINT	MINT	MSUT	MIGT	Não selecionados
16	MINT	MINT	MINT	MIGT	Não selecionados
17	MINT	MINT	MIGT	MIGT	Não selecionados
18	MSUT	MINT	MSUT	MIGT	Intermediários
19	MIGT	MINT	MSUT	MIGT	Intermediários
20	MINT	MIGT	MSUT	MIGT	Intermediários
21	MIGT	MINT	MIGT	MSUT	Intermediários
22	MINT	MIGT	MIGT	MSUT	Intermediários
23	MINT	MSUT	MSUT	MIGT	Intermediários
24	MIGT	MINT	MINT	MSUT	Intermediários
25	MINT	MIGT	MINT	MSUT	Intermediários
26	MINT	MSUT	MIGT	MSUT	Intermediários
27	MSUT	MINT	MIGT	MSUT	Intermediários
28	MIGT	MINT	MSUT	MINT	Intermediários
29	MINT	MIGT	MSUT	MINT	Intermediários
30	MINT	MSUT	MINT	MSUT	Intermediários

(Continua)

Regras	PG <sub>22</sub> <sup>+</sup>	PG <sub>23</sub>	AG <sub>22</sub>	AG <sub>23</sub>	ÍNDICE
31	MSUT	MINT	MINT	MSUT	Intermediários
32	MINT	MSUT	MSUT	MINT	Intermediários
34	MIGT	MIGT	MIGT	MIGT	Ótimo
35	MIGT	MINT	MINT	MINT	Ótimo
36	MIGT	MINT	MIGT	MINT	Ótimo
37	MSUT	MIGT	MSUT	MIGT	Ótimo
38	MIGT	MIGT	MSUT	MIGT	Ótimo
39	MIGT	MINT	MINT	MIGT	Ótimo
40	MIGT	MINT	MIGT	MIGT	Ótimo
41	MINT	MIGT	MIGT	MIGT	Ótimo
42	MSUT	MSUT	MSUT	MIGT	Ótimo
43	MINT	MIGT	MINT	MIGT	Ótimo
44	MIGT	MIGT	MIGT	MSUT	Ótimo
45	MINT	MIGT	MIGT	MINT	Ótimo
46	MIGT	MSUT	MSUT	MIGT	Ótimo
47	MINT	MIGT	MINT	MINT	Ótimo
48	MIGT	MSUT	MINT	MSUT	Ótimo
49	MSUT	MIGT	MINT	MSUT	Ótimo
50	MIGT	MIGT	MINT	MSUT	Ótimo
51	MSUT	MSUT	MIGT	MSUT	Ótimo
52	MIGT	MSUT	MIGT	MSUT	Ótimo
53	MSUT	MIGT	MIGT	MSUT	Ótimo
54	MIGT	MSUT	MSUT	MINT	Ótimo
55	MSUT	MIGT	MSUT	MINT	Ótimo
56	MIGT	MIGT	MSUT	MINT	Ótimo
57	MINT	MSUT	MIGT	MINT	Ótimo
58	MSUT	MINT	MIGT	MINT	Ótimo
59	MINT	MSUT	MINT	MIGT	Ótimo
60	MSUT	MINT	MINT	MIGT	Ótimo
61	MINT	MSUT	MIGT	MIGT	Ótimo
62	MSUT	MINT	MIGT	MIGT	Ótimo
63	MSUT	MINT	MINT	MINT	Ótimo
64	MSUT	MSUT	MINT	MSUT	Ótimo
65	MSUT	MSUT	MSUT	MINT	Ótimo
66	MINT	MSUT	MINT	MINT	Ótimo
67	MSUT	MSUT	MINT	MINT	Ideal
68	MIGT	MSUT	MINT	MINT	Ideal
69	MIGT	MIGT	MINT	MINT	Ideal
70	MSUT	MSUT	MIGT	MINT	Ideal
71	MIGT	MSUT	MIGT	MINT	Ideal

(Conclusão)					
Regras	PG <sub>22</sub> <sup>+</sup>	PG <sub>23</sub>	AG <sub>22</sub>	AG <sub>23</sub>	ÍNDICE
72	MSUT	MIGT	MIGT	MINT	Ideal
73	MSUT	MSUT	MINT	MIGT	Ideal
74	MIGT	MSUT	MINT	MIGT	Ideal
75	MSUT	MIGT	MINT	MIGT	Ideal
76	MSUT	MSUT	MIGT	MIGT	Ideal
77	MSUT	MIGT	MINT	MINT	Ideal
78	MIGT	MIGT	MIGT	MINT	Ideal
79	MIGT	MIGT	MINT	MIGT	Ideal
80	MIGT	MSUT	MIGT	MIGT	Ideal
81	MSUT	MIGT	MIGT	MIGT	Ideal

MINT<sup>+</sup>: grupo de média inferior à testemunha; MIGT: grupo de média igual à testemunha; MSUT: grupo de média superior à testemunha.

Fonte: Do autor (2024).

Uma vez submetido os dados de cada linhagem ao controlador fuzzy, foram realizadas as seguintes etapas: Fuzzyficação, Implicação, Agregação e Defuzzyficação. A fuzzyficação consistiu na obtenção das pertinências de cada linhagem em cada um dos grupos das variáveis PG<sub>22</sub>, PG<sub>23</sub>, AG<sub>22</sub>, AG<sub>23</sub>. Essa operação foi necessária pois as operações matemáticas do controlador fuzzy durante a etapa de implicação são realizadas somente com os valores de pertinência. A implicação consistiu na obtenção das pertinências das linhagens nos grupos da variável de saída (Índice) para cada uma das regras. Obtidas as saídas para cada uma das regras, estas foram combinadas na etapa de agregação. O método de soma das pertinências obtidas na implicação de cada regra foi adotado durante a agregação. A defuzzyficação foi realizada como a última etapa do controlador fuzzy, que consistiu em converter a área agregada de todas as regras em um valor único da variável de saída (Índice). O método do centroide foi adotado na defuzzyficação. Todas as etapas foram realizadas para cada uma das linhagens a fim de obter o valor do índice para cada uma destas. As linhagens foram ranqueadas com base no índice do controlador fuzzy. As melhores linhagens que apresentaram valores de índice fuzzy superior a 50 foram selecionadas para serem avaliadas em um ensaio intermediário de linhagens para o Estado de Minas Gerais.

Todas as análises estatísticas foram realizadas por meio do programa R (R Core Team, 2023). O controlador fuzzy foi desenvolvido com auxílio da biblioteca Scikit-Fuzzy (Warner, 2019) da linguagem Python (Python Software Foundation, 2024).

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O efeito de linhagens foi significativo ( $P < 0,01$ ) para PG e AG nas safras das águas de 2022 e seca de 2023 (Tabela 5). Portanto, verificou-se que houve pelo menos uma linhagem que diferiu das demais quanto a estes caracteres avaliados em cada uma das safras. Os experimentos apresentaram elevadas médias de PG (2786,58 e 3484,55 kg ha<sup>-1</sup>) e notas de AG iguais a 2,63 (águas – 2022) e 2,17 (seca – 2023) (Tabela 5). Essas médias de PG foram superiores à média nacional para este caráter, que é de 1571 kg ha<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2023). Estes resultados foram um indício da possibilidade de seleção de linhagens superiores de feijão preto.

**Tabela 5** - Resumo da análise individual de variância/deviance para os caracteres produtividade (PG) e aspecto de grãos (AG) avaliados nos experimentos conduzidos nas safras das águas de 2022 e seca de 2023.

FV <sup>+</sup>	GLN	Águas - 2022				Seca - 2023			
		AG		PG		AG		PG	
		GLD	RV/F	GLD	RV/F	GLD	RV/F	GLD	RV/F
B/R	1	-	0,71 <sup>ns</sup>	-	0,14 <sup>ns</sup>	-	2,5 <sup>ns</sup>	-	1,30 <sup>ns</sup>
Rep	2	18,89	3,04 <sup>ns</sup>	16,51	1,62 <sup>ns</sup>	21,27	6,84 <sup>**</sup>	19,91	23,65 <sup>**</sup>
Lin	168	200,40	5,53 <sup>**</sup>	179,16	2,88 <sup>**</sup>	305,91	4,92 <sup>**</sup>	273,48	1,93 <sup>**</sup>
MG		2,63		3484,55		2,17		2786,58	
MT		1,68		4109,62		1,66		3020,55	
$r_{\hat{g}g}$		0,91		0,81		0,89		0,69	
CV		13,44		13,13		19,04		14,64	
EMCt		0,31		402,58		0,34		338,11	

<sup>\*\*</sup> Significativo a 1% de probabilidade pelo teste de Wald para os efeitos fixos ou pelo teste de razão de verossimilhança para os efeitos aleatórios, <sup>ns</sup> Não significativo pelo teste de Wald para os efeitos fixos ou pelo teste de razão de verossimilhança para os efeitos aleatórios. FV<sup>+</sup>: Fontes de variação; GLN: Graus de liberdade do numerador; GLD: Graus de liberdade do denominador estimado pelo método de Satterthwaite; RV/F: Razão de verossimilhança para os efeitos aleatórios ou estatística de F do teste de Wald; B/R: Bloco dentro de repetição; Rep: Repetição; Lin: Linhagem; MG: Média geral; MT: Média da testemunha; CV: Coeficiente de variação; EMCt: Erro médio de comparação das linhagens com a testemunha BRS FP 403.

Fonte: Do autor (2024).

As acurácias de AG nos experimentos foram superiores a 0,89, enquanto que para PG as acurácias foram iguais a 0,69 e 0,81 nas safras da seca de 2023 e águas de 2022, respectivamente. Estimativas de acurácia semelhantes para estes caracteres também foram observadas por Santana *et al.* (2023). Estes valores indicam que as avaliações destes caracteres apresentaram precisão experimental alta (Resende & Duarte, 2007). Além disso, os CV's para

todos os caracteres situaram-se abaixo de 20% em ambas as safras. Segundo Pimentel Gomes (1985), as avaliações de PG e AG em ambas as safras apresentaram alta precisão experimental. Estimativa semelhante de CV (16,4%) para PG foi encontrado por Trindade *et al.* (2020), que também verificou alta precisão experimental.

Os efeitos de linhagens, ambientes e interação linhagens por ambientes (LxA) foram significativos ( $P < 0,01$ ) nas análises conjuntas de variância/deviance para PG e AG (Tabela 2). As estimativas de correlação entre as médias das linhagens nas safras das águas de 2022 e da seca de 2023 para PG e AG foram 0,64 e 0,23 (Tabela 6), respectivamente. Estas estimativas foram estatisticamente diferentes de zero pelo teste t ( $P < 0,01$ ). Portanto, observou-se uma maior associação entre as médias das linhagens para AG nas duas safras, enquanto que para PG, esta associação foi de baixa magnitude. Esses resultados revelam que houve maior mudança no ranqueamento das linhagens para PG nas duas safras do que para AG. Isso justifica a adoção das médias das linhagens destes caracteres em cada uma das safras no controlador fuzzy para auxiliar na seleção das linhagens de feijão preto (Figura 5).

**Tabela 6** - Resumo da análise conjunta de variância/deviance para os caracteres produtividade (PG), e aspecto de grãos (AG) avaliados nos experimentos conduzidos nas safras das águas de 2022 e seca de 2023.

FV <sup>+</sup>	GLN	AG		PG	
		GLD	RV/F	GLD	RV/F
B/A	1	-	3,29 <sup>ns</sup>	-	1,2 <sup>ns</sup>
R/A	4	41,18	5,28 <sup>**</sup>	36,64	12,39 <sup>**</sup>
Amb (A)	1	40,72	227,74 <sup>**</sup>	36,08	471,40 <sup>**</sup>
Lin (L)	168	502,12	8,37 <sup>**</sup>	447,14	3,10 <sup>**</sup>
L x A	168	497,32	1,79 <sup>**</sup>	466,26	1,86 <sup>**</sup>
MG			2,4		3135,7
r			0,64 <sup>**</sup>		0,23 <sup>**</sup>

\*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste de Wald para os efeitos fixos ou pelo teste de razão de verossimilhança para os efeitos aleatórios, <sup>ns</sup> Não significativo pelo teste de Wald para os efeitos fixos ou pelo teste de razão de verossimilhança para os efeitos aleatórios. FV<sup>+</sup>: Fontes de variação; GLN: Graus de liberdade do numerador; GLD: Graus de liberdade do denominador estimados pelo método de Satterthwaite; RV/F: Razão de verossimilhança para os efeitos aleatórios ou estatística de F do teste de Wald; B/A: Bloco dentro de ambiente; R/A: Repetição dentro de ambiente; Amb: Ambiente; Lin: Linhagem; MG: Média geral; r: correlação de Spearman entre as médias das linhagens nas safras das águas de 2022 e seca de 2023.

Fonte: Do autor (2024).

A cultivar BRS FP 403 foi a testemunha que apresentou melhor desempenho quanto a PG e AG nas duas safras avaliadas. As médias de PG desta cultivar foram 4109,62 e 3020,55 kg ha<sup>-1</sup> e de AG foram de 1,68 e 1,66 nas safras das águas de 2022 e seca de 2023, respectivamente (Tabela 7; Figura 8). Valores de PG semelhantes a estes tem sido observados

em áreas de alto nível tecnológico (Cardoso *et al.*, 2021). Além disso, notas de AG inferiores a 2,5 como os observados para esta cultivar são desejáveis, pois indicam que tem grãos com boa aceitação comercial. Elevada produtividade de grãos e qualidade comercial dos grãos são as duas principais demandas dos produtores, cerealistas e consumidores.

Segundo (Souza *et al.*, 2019), a BRS FP403 é uma cultivar de feijão comum da classe comercial de feijão preto com alto rendimento e potencial produtivo de grãos, alta qualidade comercial culinária, possui resistência moderada à murcha de fusarium (*Fusarium oxysporum* f. sp. *phaseoli*) e doenças de podridão radicular (*Fusarium solani* f. sp. *phaseoli* e *Rhizoctonia solani*). Além disso, esta é amplamente adaptada a várias regiões do Brasil podendo ser cultivada nas safras de águas, seca e inverno nas principais áreas produtoras de feijão comum do Brasil. Por estes motivos, a cultivar BRS FP 403 foi considerada como referência para comparar as linhagens de feijão preto avaliadas neste trabalho.

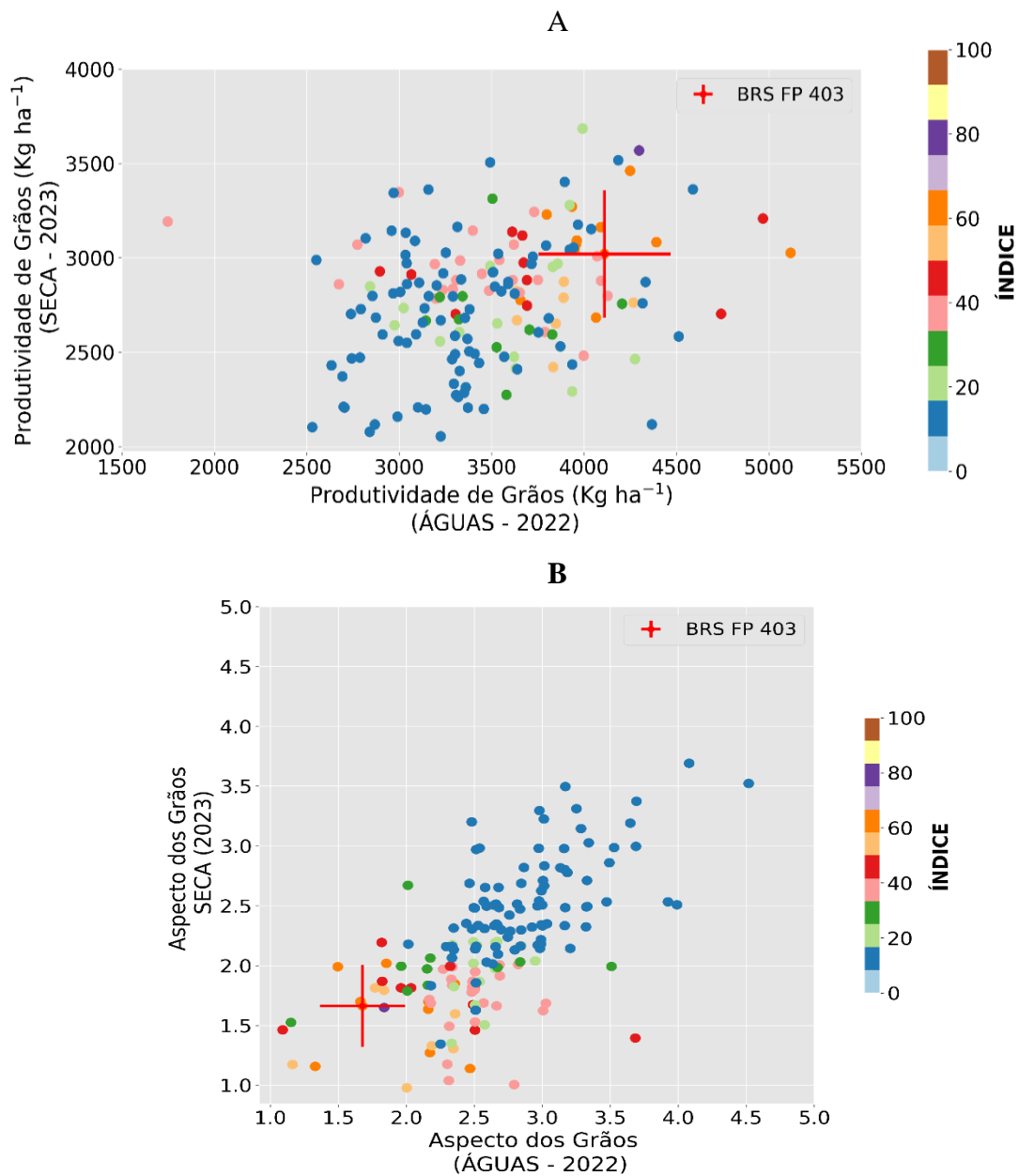
**Tabela 7-** Médias ajustadas de produtividade (PG) e de aspecto de grãos (AG) das linhagens de feijão preto com índice fuzzy igual ou superior a 50 e das testemunhas avaliadas nos experimentos nas safras das águas de 2022 e seca de 2023.

(Continua)					
LINHAGENS	AG <sub>22</sub> <sup>+</sup>	PG <sub>22</sub> <sup>+</sup>	AG <sub>23</sub> <sup>+</sup>	PG <sub>23</sub> <sup>+</sup>	ÍNDICE
UFLAP 147	1,84	4297,74	1,65	3568,64	80,19
UFLAP 148	1,66	4064,77	1,70	2683,24	60,81
UFLAP 179	2,17	3960,54	1,27	3091,40	60,90
UFLAP 125	2,16	3934,29	1,70	3271,10	60,56
UFLAP 84	2,16	3949,28	1,63	3044,58	60,16
UFLAP 140	2,47	3957,98	1,14	3074,68	59,29
UFLAP 228	1,85	4391,26	2,02	3082,78	59,92
UFLAP 145	2,50	4090,31	1,81	3162,22	59,16
UFLAP 175	2,50	4248,89	1,81	3461,33	58,76
UFLAP 170	2,36	5117,31	1,85	3026,13	59,14
UFLAP 78	1,33	3655,23	1,16	2776,16	59,72
UFLAP 230	1,50	3797,82	1,99	3229,56	59,43
UFLAP 143	2,19	3890,66	1,33	2873,13	53,61
UFLAP 81	1,84	3635,09	1,79	2822,98	52,86
UFLAP 210	2,00	3847,29	1,00	2651,79	53,76
UFLAP 169	2,35	3889,44	1,31	2788,51	50,68
BRS FP 403	1,68	4109,62	1,66	3020,55	61,01
IPR Urutau	2,36	4267,53	1,60	2762,37	55,10
Ouro Negro	1,77	3832,94	1,81	2420,53	51,51
BRS Esplendor	3,16	3638,69	2,80	2409,10	13,95

LINHAGENS	AG22+	PG22+	AG23+	PG23+	(Conclusão)
					ÍNDICE
IPR Tuiuiu	2,50	3552,21	2,48	2822,60	13,92
IPR Uirapuru	2,98	3369,00	2,14	2570,47	16,26
BRS Esteio	2,84	3506,51	2,47	2923,10	13,45

PG<sub>22</sub><sup>+</sup>: produtividade de grãos na safra das águas de 2022; PG<sub>23</sub><sup>+</sup>: produtividade de grãos na safra da seca de 2023; AG<sub>22</sub><sup>+</sup>: aspecto de grãos na safra das águas de 2022; AG<sub>23</sub><sup>+</sup>: aspectos de grãos na safra da seca de 2023. Fonte: Do autor (2024).

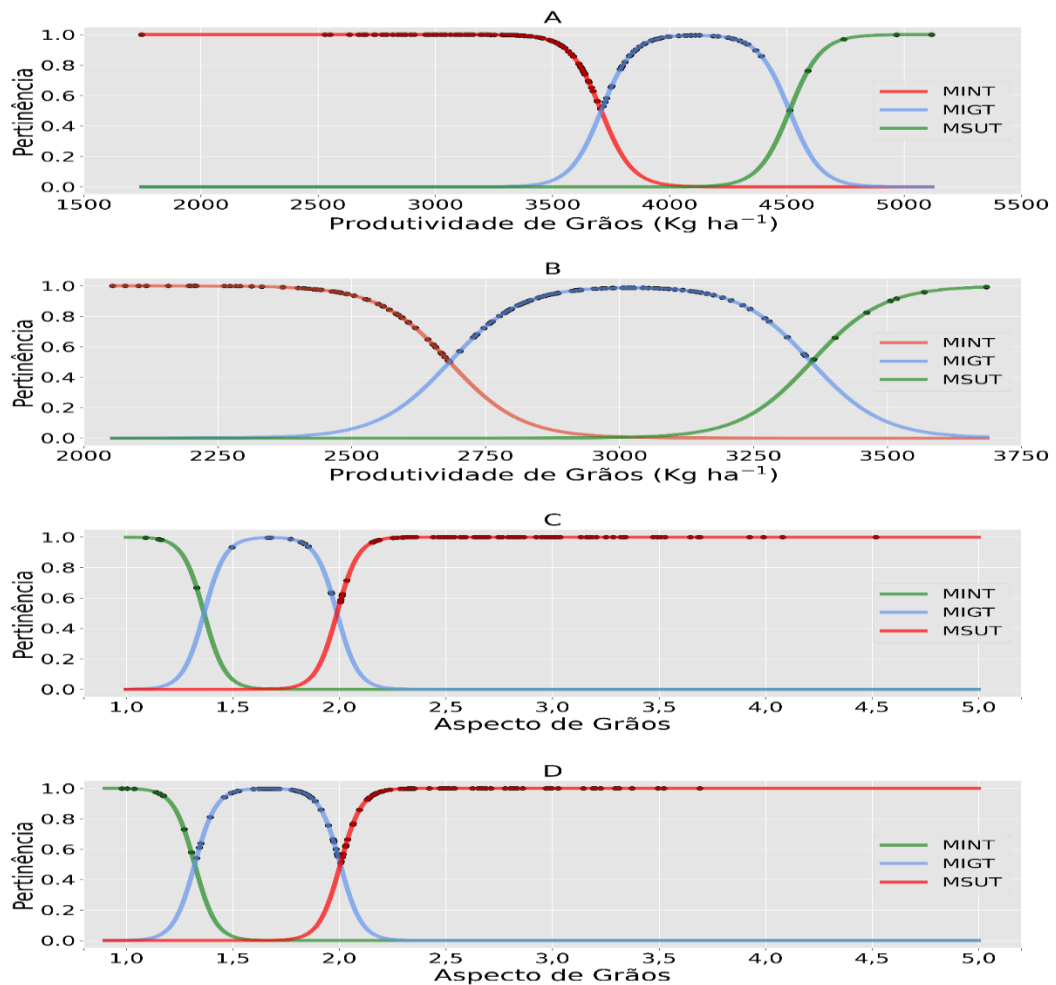
**Figura 7** - Dispersão das médias das linhagens quanto a produtividade (A), e aspecto comercial dos grãos (B) nas safras das águas de 202 e seca de 2023; e mapa de cor destas linhagens utilizando o índice fuzzy como referência.



Fonte: Do autor (2024).

Cerca de 27 e 64% das linhagens apresentaram performance igual ou superior a BRS FP 403 quanto a PG nas safras das águas de 2022 e seca de 2023 (Figuras 7 e 8). Dentre estas, somente 3 e 5% das linhagens foram superiores a esta testemunha nestas respectivas safras. Entretanto, nenhuma linhagem foi superior à BRS FP 403 em ambas as safras simultaneamente para este caráter. Já para AG, observou-se que 8,5 e 39% das linhagens foram iguais ou superiores a esta testemunha, mas somente 2 e 5% destas foram superiores nas safras das águas de 2022 e seca de 2023, respectivamente. A linhagem UFLAP 78 apresentou notas médias de AG inferiores à cultivar BRS FP 403 em ambas as safras (Tabela 7; Figura 8B). Apesar do pequeno percentual de linhagens superiores a esta cultivar, obsevou-se que houve grande número de linhagens superiores às cultivares IPR Uirapuru, IPR Tuiuiu, BRS Esteio e BRS Esplendor, especialmente para AG.

**Figura 8** – Dispersão das médias e pertinências predominantes das linhagens nos grupos de genótipos com médias inferiores (MINT), iguais (MIGT) e superiores (MSUT) à testemunha BRS FC 403 das variáveis fuzzy de entrada produtividade de grãos (PG) e aspecto de grãos (AG) avaliadas nas safras das águas de 2022 e seca de 2023. .



Fonte: Do autor (2024).

As testemunhas que apresentaram índice fuzzy superior a 50 foram BRS FP 403, IPR Urutau e Ouro Negro. Estas duas ultimas cultivares demonstraram desempenho semelhante a BRS FP 403 em pelo três das quatro avaliações realizadas e inferior em uma destas, sejam elas de PG ou AG. Estas apresentaram predominancia no grupo de genótipos ótimos na variável fuzzy de saída (índice). As outras testemunhas apresentaram valores de índice inferiores a 17, que indica que foram alocadas no grupo de linhagens não selecionados. Dentre as 162 linhagens, observou-se que somente 10% apresentaram índice fuzzy superior 50 (Figura 8), que indica que estas linhagens tem predominancia nos grupos de linhagens ótimas ou ideais. Portanto, estas foram selecionadas para serem incluídas em ensaio intermediário para o Estado de Minas Gerais.

As linhagens selecionadas apresentaram notas médias de AG entre 1,33 e 2,50 e de 1,00 a 2,02 nas safras das águas de 2022 e seca de 2023 (Tabela 7), respectivamente. Estes valores indicam que estas linhagens demonstraram elevada qualidade comercial dos grãos. Estas linhagens também atenderam o critério de linhagens com nota inferior a 2,5 em ambas as safras, que indica que tem elevado potencial quanto a este caráter. Resultados semelhantes, com valores de AG inferiores a 2,0 foram obtidos por Barili *et al.* (2016), e por Santana *et al.* (2020).

As linhagens com índice fuzzy superior a 50 apresentaram médias de PG superiores a 3635,09 e a 2651,79 kg ha<sup>-1</sup> nas safras de águas de 2022 e seca de 2023, respectivamente. Estes valores foram muito superiores à média de produtividade de grãos do Brasil, que é de 1571 kg ha<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2023). Além disso, esses valores são semelhantes aos obtidos em lavouras de feijoeiro de alto nível tecnológico e com emprego de irrigação e de aplicação de doses de 120 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogénio em cobertura (Viana, 2017). Silveira *et al.* (2023) também obteve média de produtividade semelhante as deste trabalho.

A linhagem UFLAP 147 destacou-se por apresentar índice fuzzy igual 80,19. Esta foi considerada um genótipo ideal pois sua pertinência foi superior a 0.50 neste grupo da variável fuzzy de saída. O valor de índice desta linhagem foi elevado, pois esta foi superior à BRS FP 403 em produtividade de grãos na safra da seca de 2023 e igual a esta testemunha nas demais avaliações. Todas as demais linhagens selecionadas foram consideradas linhagens ótimas, pois os seus valores de índice variaram de 50,68 a 60,90. Estes valores as caracterizam como genótipos ótimos, pois conforme figura 6 observa-se que qualquer linhagem que apresentar valor de índice superior a 50 apresentará pertinência superior a 0,50 nos grupos de genótipos ótimos ou ideais da variável fuzzy de saída (Índice).

A interação linhagens por safras para PG pode ter dificultado a seleção das linhagens uma vez que a correlação entre as duas safras foi igual a 0,23. Portanto, muitas das linhagens avaliadas podem não ter comportamento coincidente nas duas safras como observado na figura 7A. Observou-se que linhagens que apresentaram produtividade de grãos similar à cultivar BRS FP 403 em uma safra podem ter média inferior a esta testemunha na outra safra. Conforme as regras estabelecidas na tabela 4, linhagens com este comportamento para qualquer dos caracteres seriam alocadas nos grupos de genótipos não selecionados ou intermediários da variável fuzzy de saída (índice). Assim, muitas das linhagens apresentaram valores de índice fuzzy inferiores a 50 devido a esta pronunciada interação linhagens por safras para PG.

A interação linhagens por ambientes é um dos principais desafios na cultura do feijoeiro, especialmente por que o feijão é cultivado durante todo o ano em diferentes regiões com diferentes condições climáticas e de solo (Borém; Carneiro, 2015). A safra é o que tem mais influenciado o comportamento diferencial dos genótipos do feijoeiro pois de acordo com a época de plantio as condições ambientais são bastante distintas (Oliveira *et al.*, 2005). Além disso, os patógenos que afetam o feijoeiro são distintos conforme a safra (Gomez *et al.*, 2024). Assim, o desempenho dos genótipos quanto a produtividade de grãos pode ser distinto de acordo com a resistência a estes patógenos. Trabalhos como este são de grande importância para selecionar dentre um grande número de linhagens aquelas que tiveram melhor performance em condição de multiambientes e multicares para serem melhor avaliadas em maior número de locais, anos e safras em novos ensaios intermediários ou de valor de cultivo e uso. Condição esta que seria impossível de ser realizada com um grande número de genótipos a serem avaliados.

Outro aspecto que deve ser considerado ao observar o pequeno número de linhagens selecionadas é a origem das linhagens avaliadas. Estas foram derivadas da população base do primeiro ciclo de seleção recorrente da UFV (Moura *et al.*, 2013). Esta população foi submetida, no município de Lavras, a seis gerações de autofecundação pelo método do bulk até a derivação destas linhagens. Apesar da população base deste programa de melhoramento ter sido conduzida desta forma sob efeito da seleção natural em Lavras, esta população foi obtida no programa de melhoramento da UFV, localizado em Viçosa. Todo o melhoramento pelo qual esta população foi submetido anteriormente foi nas condições do município de Viçosa. Assim, os genes que se expressam em Viçosa não necessariamente se expressariam em Lavras, devido às condições ambientais diferentes. Assim, a interação linhagens por locais também pode estar

afetando indiretamente o desempenho das linhagens. Por isso, recomenda-se realizar o cruzamento entre as linhagens que se destacaram neste trabalho na condição de Lavras. Assim, será possível obter linhagens mais adaptadas às condições da mesorregião do Campo das Vertentes.

Apesar do pequeno número de linhagens selecionadas ao empregar o controlador fuzzy, este foi capaz de discrimina-las quando avaliadas em condição de multicares e multiambientes. O controlador proposto neste trabalho apresenta vantagens como a facilidade de interpretação dos resultados, evitar problemas relacionados a multicolinearidade existente entre as características analisadas, contabilizar a interação genótipos por ambientes e utilizar a informação das testemunhas para auxiliar na seleção. Cruz e Nascimento (2018) também enfatizam que esta abordagem permite incorporar o conhecimento de especialistas sobre determinado problema durante o desenvolvimento dos controladores fuzzy. Esta capacidade deve ser destacada uma vez que os programas de melhoramento e os pesquisadores tem adquirido grande conhecimento sobre a natureza dos principais caracteres agronomicos ao longo do tempo. Porém, estas informações muitas das vezes não são incluídas durante as análises nos índices de seleção. Assim, a abordagem fuzzy permite tornar a seleção mais prática a todos os programas de melhoramento.

A lógica fuzzy ainda tem sido pouco empregada para auxiliar a seleção de genótipos no melhoramento de plantas. Carneiro *et al.* (2018) desenvolveram controladores fuzzy para facilitar a interpretação e junção de parâmetros de diferentes métodos de adaptabilidade e estabilidade com intuito de auxiliar na identificação do comportamento de linhagens de feijão. Outros trabalhos também utilizaram da mesma proposta na cultura do arroz (Silva Júnior *et al.*, 2021) e algodão (Cardoso *et al.*, 2021). O presente trabalho propôs um controlador fuzzy mais simples que os já desenvolvidos nestes trabalhos, pois utilizou as próprias médias de produtividade e aspecto de grãos. Além disso, empregou como critério uma testemunha avaliada no experimento para auxiliar na formação dos grupos para cada variável de entrada. Isso é uma grande vantagem na seleção de linhagens uma vez que deseja-se obter linhagens que são superiores às cultivares disponíveis no mercado. Assim, esta estratégia permitiu aos programas de melhoramento selecionar linhagens iguais ou superiores a testemunha que mais se destacou nos experimentos. Outras possibilidades de adaptações neste controlador fuzzy podem ser realizadas como a incorporação de novas variáveis de entrada assim como parâmetros oriundos de outras análises.

## **8 Conclusão**

Foi desenvolvido um controlador fuzzy que permitiu discriminar as linhagens de feijão preto avaliadas em condição de multiambientes e multicares. Por meio desta metodologia foram selecionadas 16 linhagens de feijão preto para compor um ensaio intermediário no Estado de Minas Gerais. Dentre estas, destaca-se a linhagem UFLAP 147 por apresentar desempenho igual ou superior à cultivar BRS FP 403 quanto a produtividade e aspecto comercial dos grãos.

## REFERÊNCIAS

- ANJOS, R S R.; MARÇAL, T S.; CARNEIRO, P C S.; CARNEIRO, J E S. **New proposals to estimate unbiased selection gain and coefficient of variation in traits evaluated using score scales.** Crop Science, Madison, v. 59, n. 3, p. 937-944, Maio/Junho, 2019.
- BARILI L D, VALE N M.; CARNEIRO, J E D S.; SILVA, F F.; DA SILVA, F L. **Five decades of black common bean genetic breeding in Brazil.** Pesq. Agropec. Trop., Goiânia, v. 46, n. 3, p. 259-266, Jul./Sep. 2016.
- BARILI L D.; VALE, N M.; PRADO A L.; CARNEIRO, J E S.; SILVA, F F.; NASCIMENTO, M. (2015). **Genotype-environment interaction in common bean cultivars with carioca grain cultivated in Brazil in the last 40 years.** Crop Breeding and Applied Biotechnology 15: 244-250.
- BARILI, L D.; VALE, N M.; MORAIS, P P P.; BALDISSERA, J N C.; ALMEIDA, C B.; ROCHA, F.; VALENTINI, G.; BERTOLDO, J G.; COIMBRA, J L M.; GUIDOLIN, A F. 2011. **Phenotypic correlation between yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.).** Semina: Ciências Agrárias 32: 1263-1274 (in Portuguese, with abstract in English).
- BOLSINHA. Informativos: **Boletim informativo feijão.** Disponível em: <https://www.bolsinha.com.br/br/>. Acesso em: 25 fev. 2020.
- BORÉM, A., MIRANDA, G. V., FRITSCHÉ-NETO, R. (2017) **Melhoramento de Plantas.** 7. ed. Viçosa: UFV.
- CARDOSO, G A.; DOS SANTOS, J A.; FÁVARO, L H D S.; DE SANTANA, M J. **Utilização de inoculantes em sementes de feijão comum irrigado.** Revista Inova Ciência & Tecnologia, Uberaba, Volume 7, 2021 <https://doi.org/10.46921/rict2021-1132>.
- CARNEIRO, J E S.; PAULA, J R T J.; BORÉM, A.; **Feijão do plantio à colheita.** Ed. UFV, Viçosa – MG, p. 37-66, 2015.
- CHIMENEZ-FRANZON, R.; GONÇALVES-VIDIGAL, M C.; VALENTINI, G.; MOIANA, L. D.; SOTO, R I C.; SOUSA, L L.; VIDIGAL FILHO, P S. (2022). **Genetic parameters, yield adaptability and stability of common bean obtained through mixed models analyses.** Agronomy Science and Biotechnology, 8, 1–16.
- CRUZ, C D.; NASCIMENTO, M. **Inteligência computacional aplicada ao melhoramento genético.** Viçosa, MG: Ed. UFV, 2018. 414 p.
- GOMEZ, D.; SELVARAJ, M G.; CASAS, J.; MATHIYAZHAGAN. K.; RODRIGUEZ, M.; ASSEFA, T.; MLAKI, A.; NYAKUNGA, G.; KATO, F.; MUKANKUSI, C.; GIRMA, E.; MOSQUERA, G.; ARREDONDO, V.; ESPITIA, E. **Advancing common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) disease detection with YOLO driven deep learning to enhance agricultural AI.** Scientific Reports | (2024) 14:15596 | <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66281-w>.

JÚNIOR, S.; CRUZ, C D.; SILVA, G N.; NASCIMENTO, M.; AZEVEDO, C F. (2021). **Prediction of the importance of auxiliary traits using computational intelligence and machine learning: A simulation study.** *PLoS ONE*, 16(11).  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257213>.

MELO, L C.; DEL PELOSO, M J.; PEREIRA, H S.; FARIA, L C.; COSTA, J G C.; DÍAZ, J L C.; RAVA, C A.; WENDLAND, A.; ABREU, A F B. BRS Estilo: common bean cultivar with carioca grain, upright growth and high yield potential. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 10, n. 4, p. 377-379, 2010.

MOURA, L M. **Cruzamentos dialélicos visando à escolha de genitores no melhoramento de feijão preto.** 2013. 30 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

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

PIMENTEL- GOMES, F. **Estatística experimental.** São Paulo:USP/ESALQ, 1985, 467 p.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Language Site:** Documentation, 2024. Página de documentação. Disponível em: <<https://www.python.org/doc/>>. Acesso em: 06 de Julho de 2023.

R CORE TEAM (2023). **R: A language and Environment for statistical Computing.** R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria. <https://www.R-project.org/>.

RAMALHO, M A P.; PIROLA, L H.; ABREU, A F B. **Alternativas na seleção de plantas de feijoeiro com porte ereto e grão tipo carioca.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 33, n. 12, p. 1989-1994, 1998.

RESENDE, M D V. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético.** Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 362 p.

RIBEIRO N D.; MAZIERO S M. **Environmental variability in indirect selection for grain yield in common bean lines.** *Sci. Agric.* v.80, e20220082, 2023.  
<http://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0082>.

SANTANA, A S.; MARÇAL, S.; SALVADOR, F V.; PEIXOTO, A.; SOUZA CARNEIRO, P C.; & CARNEIRO, S. (2023). **Analysis of advanced generation multistage field trials data in autogamous plant breeding: An evaluation in common Bean.** *Crop Science*, 63(3), 1221-1233. <https://doi.org/10.1002/csc2.20935>

SATTERTHWAITE, F E. **An approximate distribution of estimates of variance components.** *Biometrics Bulletin*, Washington, v. 2, n. 6, p. 110-114, 1946.

SILVEIRA, P M.; STONE, L F.; GUIMARÃES, C M.; GONZAGA, A C O. **Parcelamento e aplicação tardia da adubação nitrogenada no feijoeiro irrigado em sistema plantio direto.** *Global Science and Technology* 15(2): 26-30, 2023.

SOUZA, T L P O.; PEREIRA, H S., PELOSO, M J D.; FARIA, L C.; COSTA, J G C.; WENDLAND, A.; DÍAZ, J L C.; MAGALDI, M C S.; AGUIAR, M S.; CARVALHO, H W L.; FILHO, B F S.; MELO, C L P.; COSTA, A F.; ALMEIDA, V M.; POSSE, S C P.; MELO, L C. **Crop Breeding and Applied Biotechnology 19: 240-244, 2019.**

VIANA, T E F. Instituto Federal Goiano – Campus Ceres/GO, março de 2017. **Aspecto produtivo da cultura do feijoeiro sob diferentes lâminas via pivô central.** Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de mestre em irrigação no cerrado. Março de 2017.

WARNER, J. *scikit-fuzzy* 0.4.2. **PyPI**, 14 nov. 2019. Disponível em:<  
<https://pypi.org/project/scikit-fuzzy/>>. Acesso em: 30 de abr. 2024.

YAN, W.; FRÉGEAU-REID, J.; MOUNTAIN, N.; KOBLE, J. **Genotype and management evaluation based on genotype by yield\*trait (GYT) analysis.** *Crop Breed Genet Genom*, v. 1, n. e190002, p. 1-21, 2019.